

Das Grundwasser in der Oberen Süßwassermolasse
im Raum München und Augsburg

RICHARD EGGER

1970

Das Grundwasser in der Oberen Süßwassermolasse

im Raum München und Augsburg

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung der Doktorwürde

des Fachbereiches Geowissenschaften

der Ludwig-Maximilians-Universität zu München

vorgelegt von

RICHARD EGGER

aus Bobingen

München, Juni 1978



1. Berichterstatter: Prof. Dr. F. Neumaier
 2. Berichterstatter: Prof. Dr. W.-D. Grimm
- Tag der mündlichen Prüfung: 26.7.1978

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Vorwort	1
1. Einleitung	3
1.1 Problemstellung	3
1.2 Das Untersuchungsgebiet	5
1.2.1 Abgrenzung des Gebiets	5
1.2.2 Geologischer und morphologischer Überblick	5
1.2.3 Hydrographischer Überblick	7
2. Die Geologie	9
2.1 Die Obere Süßwassermolasse (OSM) in Bayern	9
2.2 Die OSM im Arbeitsgebiet	12
2.2.1 Die Korngrößen der Kies- und Sandfraktion	16
2.3 Lagerung der OSM und ihre Restmächtigkeit	17
3. Die Hydrogeologie des Untersuchungsgebietes	19
3.1 Hydrogeologischer Überblick	19
3.2 Grundwasserdruckspiegel und -höhengleichen	22
3.2.1 Druckspiegelschwankungen	22
3.2.2 Höhengleichen des jungtertiären Grundwassers	24
3.2.3 Grundwasserfließrichtung und -gefälle	27
3.3 Die Wasserwegsamkeit der Sedimente der OSM	28
3.3.1 Die Ergiebigkeit des Aquifers	28
3.3.2 Die spezifische Ergiebigkeit	30
3.3.3 Ermittlung der Durchlässigkeiten aus Pumpversuchen	34
3.3.4 Im Labor ermittelte k_f -Werte	38
3.3.4.1 Untersuchungsmethoden	39
3.3.4.2 Untersuchungsergebnisse	40
3.4 Transmissivität	44
3.5 Porosität	48
3.6 Grundwasserfließgeschwindigkeiten	49
3.6.1 Filtergeschwindigkeiten	50
3.6.2 Abstandsgeschwindigkeit	53

		Seite
4.	Hydrochemische Untersuchungen	54
4.1	Allgemeine Übersicht	55
4.2	Calcium, Natrium und Grundwasserhärte	60
5.	Isotopenuntersuchungen	63
5.1	Tritiumuntersuchungen	63
5.1.1	Allgemeines zur Methode	63
5.1.2	Tritiumprobennahme	64
5.1.3	Der Tritiumgehalt der Grundwasserproben	64
5.2	^{14}C -Altersbestimmungen	70
5.2.1	Allgemeines zur Methode	70
5.2.2	Ergebnisse	71
5.3	Die stabilen Isotope Deuterium und Sauerstoff-18	75
5.3.1	Allgemeine Grundlagen	75
5.3.2	Ergebnisse	77
6.	Das generelle Strömungsfeld	81
6.1	Die Potentialverteilung im Aquifer	81
6.2	Trockenwetterabfluß in Tertiärflüssen	84
6.2.1	Ergebnisse	87
7.	Zusammenfassung	90
8.	Literaturverzeichnis	97
9.	Anhang	106

Vorwort

In den Großräumen München und Augsburg wird Grundwasser aus der Oberen Süßwassermolasse in großem Umfang genutzt. Zur Beurteilung, ob dieser Grundwasserleiter ohne Überbeanspruchung im bisherigen Maße weiter oder noch zusätzlich genutzt werden kann, ist es notwendig, seinen Grundwasserhaushalt genau zu kennen. Um die wissenschaftlichen Grundlagen für jene Faktoren zu gewinnen, die den Grundwasserhaushalt bestimmen, wurde diese Arbeit auf Anregung des Bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft, München, in Angriff genommen.

Mein Dank gilt Herrn Professor Dr. F. Neumaier, der mich mit der Arbeit betraute, an ihrem Fortgang reges Interesse zeigte und mich durch mannigfache Anregungen förderte. In hohem Maße fühle ich mich Herrn Regierungsdirektor Dr. Andres, dem Leiter des Fachbereiches Hydrogeologie im Bayerischen Landesamt für Wasserwirtschaft verpflichtet. Von ihm ging die Anregung aus, das reiche Material, das beim Bayerischen Landesamt für Wasserwirtschaft liegt, im Sinne der oben angesprochenen Thematik zu bearbeiten. Herr Dr. Andres hat mir durch seine wissenschaftlichen Empfehlungen, durch seine kritischen Bemerkungen und durch seine Hilfsbereitschaft sehr viel geholfen. Herr Regierungsdirektor Dr. Söllner suchte mir die einschlägigen hydrogeologischen Unterlagen des Landesamtes heraus und gab mir zudem wertvolle Ratschläge zur Lösung meiner Aufgaben. Schließlich möchte ich allen übrigen Mitarbeitern des Landesamtes für Wasserwirtschaft, insbesondere Herrn Regierungsdirektor Rothascher danken, daß sie mich bei meinen Studien unterstützten.

Herr Professor Dr. H. Moser, Institut für Radiohydrometrie der Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung, gestattete mir in

großzügiger Weise, die Einrichtungen des Instituts zu benützen. Die Herren Dipl. -Phys. W. Rauert und W. Stichler führten die Isotopenmessungen an den Grundwasserproben am Institut für Radiohydrometrie durch. Ihnen sei stellvertretend für alle jene Mitarbeiter des Instituts für Radiohydrometrie, die zum Gelingen meiner Arbeit beitrugen, herzlich gedankt. Besonders verbunden bin ich Herrn Dr. K. -P. Seiler; er hat mir in zahlreichen Diskussionen mit seinen reichhaltigen Erfahrungen die Einarbeitung in die hydrogeologischen Fragestellungen erleichtert.

Für die Einsicht in die hydrologischen Unterlagen der Wasserwerke der Landeshauptstadt München und für die Erlaubnis zur Auswertung des Datenmaterials danke ich Herrn Stadtbaudirektor A. Rottmüller, Städtische Wasserwerke München, Herrn v. Berg, Stadtwerke Augsburg, sowie allen öffentlichen Stellen und den zahlreichen Firmen und privaten Brunnenbesitzern, die mir ihre Unterlagen über die hydrologischen Aufschlüsse zugänglich machten.

Schließlich sei noch der Geschäftsführung der Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung, Neuherberg für die großzügige finanzielle Unterstützung gedankt, ohne die diese Arbeit nicht in diesem Umfang zustandegekommen wäre.

1. Einleitung

Die grundwasserführenden Schichten der Oberen Süßwassermolasse, im folgenden kurz OSM genannt, werden im Bereich der Städte München und Augsburg in zunehmendem Maße von Industriebetrieben für die Brauchwasserversorgung, aber auch für die Trinkwasserversorgung herangezogen. So werden gegenwärtig allein im Stadtgebiet von München etwa $2,7 \text{ m}^3/\text{s}$ und im Stadtgebiet von Augsburg etwa $1,3 \text{ m}^3/\text{s}$ ^{+) an Grundwasser aus der OSM zutage gefördert und abgeleitet. Darüber hinaus wird im Tertiären Hügelland, das nördlich an den Bereich München-Augsburg angrenzt, aber auch in Gebieten, in denen quartäres Grundwasser chemisch oder bakteriologisch stark verunreinigt ist, der Grundwasserbedarf der Bevölkerung zunehmend aus dem darunter auftretenden jungtertiären Grundwasser gedeckt. Dieses tieferliegende, gespannte Grundwasser bietet den Vorteil, daß bei einer geeigneten Absperrung des oberflächennahen Grundwassers die Auslegung von Schutzgebieten sich sehr einfach gestaltet und daß zudem das Grundwasser auf Grund seiner günstigen hydrochemischen Eigenschaften kaum aufbereitet werden muß.}

1.1 Problemstellung

Da der Trinkwasserbedarf weiter anwächst, ist es naheliegend, daß das hygienisch einwandfreie Grundwasser aus der OSM in der Zukunft noch in weiterem Umfang genutzt werden soll. Da gegenwärtig der Kenntnisstand des Grundwasserhaushalts dieses jungtertiären Grundwassers und der ihn mitbestimmenden Parameter noch recht lückenhaft ist, sollen mit dieser Arbeit hydrogeologische und hydraulische Basisdaten zu diesem Fragenkomplex ermittelt werden.

+) Nach einer mündlichen Mitteilung von Herrn Regierungsdirektor Dr. Andres.

Ziel meiner Arbeit ist es, den geologischen Aufbau des Grundwasserleiters zu beschreiben, die vorhandenen hydrogeologischen Daten zu sammeln und durch ihre Auswertung die hydraulischen Kennwerte des Grundwasserleiters wenigstens in ihren jeweiligen Größenordnungen zu erfassen. Darauf aufbauend sollen in einem weiteren Teil durch Isotopenuntersuchungen Fragen der Herkunft des Grundwassers und seiner Verweilzeit im Grundwasserleiter diskutiert werden. Mit dieser Interpretation der Isotopenuntersuchungen wird schließlich versucht, großräumig und über das eigentliche Arbeitsgebiet hinausgreifend, eine hydraulische Modellvorstellung zum Strömungsfeld für das jungtertiäre Grundwasser im Untersuchungsgebiet zu entwickeln.

Die Untersuchungen begannen im Herbst 1975 und wurden im Winter 1977/78 beendet. Verständlicherweise konnte in dieser Zeitspanne ein so komplexes Thema wie der Grundwasserhaushalt eines tieferliegenden Grundwassers, über den so gut wie nichts bekannt ist und der sich zudem den konservativen, hydrologischen Untersuchungsmethoden auf Grund seiner Tiefenlage und seiner sehr geringen Fließgeschwindigkeiten entzieht, nicht erschöpfend bearbeitet werden. Ich sehe es vielmehr als Ziel dieser Arbeit an, durch das Zusammentragen von Fakten und durch die Erarbeitung neuer Daten weiteren Detailuntersuchungen den Weg zu weisen.

Insgesamt wurden etwas über 300 Bohrberichte und Kurzprofile von Brunnen- und Versuchsbohrungen ausgewertet. Naturgemäß gibt es in den Großstädten München und Augsburg wesentlich mehr Tertiärbrunnen als im Bereich kleinerer Städte oder Gemeinden. In den Großstädten existierte bereits eine Vielzahl von Industriebrunnen und zudem wurden gerade in jüngster Zeit noch eine beträchtliche Zahl an Brunnen zur Notwasserversorgung abgeteuft. Außerhalb der Großstädte bestehen im nördlichen Teil des Untersuchungsge-

biets (s. 1.2.1) mehr Tertiärbrunnen, da hier die grundwasserreichen quartären Kiese fehlen und der Trinkwasserbedarf allein aus dem Tertiär gedeckt werden muß. Im Gegensatz dazu wird im südlichen Teilgebiet aus den quartären Terrassenschottern bzw. aus den Alluvionen Grundwasser für die Trinkwasserversorgung gewonnen, so daß hier wenig Tertiärbrunnen stehen.

1.2 Das Untersuchungsgebiet

1.2.1 Abgrenzung des Gebiets

Zunächst war es die Absicht, lediglich die Großräume München und Augsburg in den Bereich meiner Arbeit einzubeziehen. Es stellte sich aber bald heraus, daß es unmöglich ist, diese Räume isoliert von ihrer Umgebung zu betrachten. Diese Tatsache führte zu einer beträchtlichen Ausdehnung des Untersuchungsgebiets, das sich schließlich auf das Gebiet der Topographischen Karten 1 : 100 000, Blatt C 7934 München, C 7930 Augsburg, sowie den südlichen Teil von Blatt C 7530 Neuburg a. d. Donau und den südwestlichen Teil von Blatt C 7534 Ingolstadt ausweitete.

Als östliche Begrenzung des Problemgebietes bot sich der Ostrand der Münchener Schotterebene an, und zwar dort, wo sie an die würm- bzw. rißeiszeitlichen Moränenwälle entlang der Linie Aying-Zorneding-Moosinning grenzt. Die Begrenzung im Süden wurde mit der Linie Starnberg-Landsberg a. Lech gefunden und im Westen wurde die Grenze bei den Tertiärhügeln, die die Lech-Wertach-Platte im Westen begrenzen, angesetzt. Im Norden schließlich erfolgte die Grenzziehung längs der Linie Moosburg-Meitingen (s. Abb. 1 und Beil. 1).

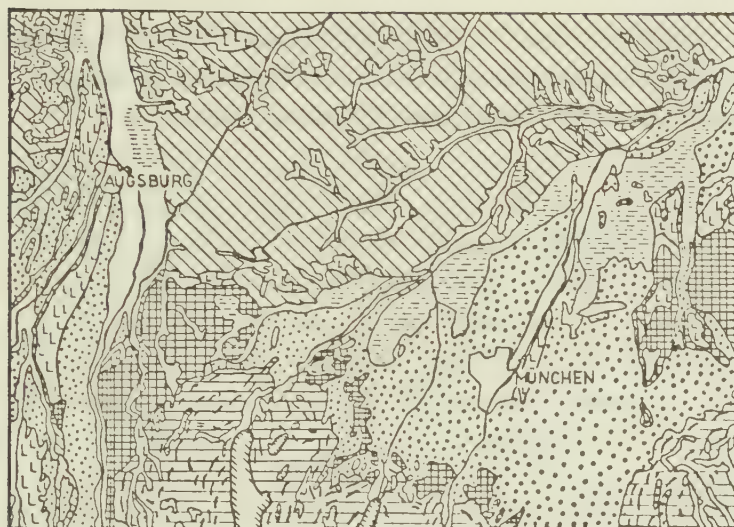
1.2.2 Geologischer und morphologischer Überblick

Das Gebiet gliedert sich geologisch wie morphologisch in drei größere Einheiten (Abb. 1):

- die ältesten im Untersuchungsgebiet anstehenden Sedimente sind die obermiozänen bis unterpliozänen Sande, Kiese und Mergel, welche die Hügellandschaft im Norden der Flüsse Maisach, Amper und Moosach aufbauen;
- Relikte rißeiszeitlicher Endmoränenwälle und gut erhaltene Wallformen der Würm-Endmoränen bilden als Zeugen der pleistozänen Vorlandvergletscherung den südlichen Rahmen für
- die zentral gelegene, morphologisch eintönige Schotterfläche der Münchener Schotterebene. Sie und die im Westen des Untersuchungsgebiets gelegene Lech-Wertach-Platte werden nach PENCK (1909) von der Sedimentfracht der Schmelzwässer aller Eiszeiten aufgebaut.

Insgesamt ist das Gelände von Süd nach Nord geneigt. Seine höchsten Erhebungen sind im Süden, im Bereich der würmeiszeitlichen Endmoränenwälle: 680 m ü. NN westlich von Schäftlarn und 673 m ü. NN südöstlich von Seefeld am Pilsensee. Die Münchener Schotterebene fällt von ca. 650 m ü. NN im Südosten bei Otterfing bzw. 620 m ü. NN südlich Gauting mit einem durchschnittlichen Gefälle von ca. 4 - 5 ‰ nach Nordosten auf etwa 460 m ü. NN bei Neufahrn. In dieser Gegend schneiden sich die Grundwasser- und die Geländeoberfläche und erzeugen die flächenhaft großen Vermoorungsgebiete des Erdinger und Dachauer Mooses, die bis an den Rand des Tertiären Hügellandes reichen.

Im Tertiären Hügelland liegen die höchsten Erhebungen mit ca. 560 m ü. NN östlich von Mering und östlich von Althegnenberg am Südrand; nach Norden und Osten verringert sich diese Höhe, so daß auch hier insgesamt ein Einfallen nach Nordosten festzustellen ist.



- | | | | |
|---|----------------------------------|---|-----------------------------|
|  | Talsedimente |  | Ältere Moränen |
|  | Torf |  | Obere Süßwasser-
molasse |
|  | Löss, Lösslehm | | |
|  | Terrassenschotter | | |
|  | Jungmoränen, z.T.
in Wallform | | |

0 5 10 15 20 km



Abb. 1: Geologische Übersichtskarte des Arbeitsgebietes
(vereinfacht nach der "Geologischen Karte von Bayern
1 : 500 000, Bayer. Geol. Landesamt, 1964)

1.2.3 Hydrographischer Überblick

Hydrographisch gehört das gesamte Gebiet zum Einzugsgebiet der Donau. Die Hauptabflüsse sind von Ost nach West: die Isar, die Amper mit der Würm und ihren linksseitigen Zuflüssen Maisach und

Glonn, weiter die Ilm, die Paar und schließlich der Lech mit der Wertach. Abgesehen vom Lech, der nach Norden fließt, ist die generelle Entwässerungsrichtung nach Nordosten gerichtet.

Klimatisch gehört das Gebiet zum Alpenvorlandstyp. Vorherrschend ist der binnenländische Niederschlagstyp mit vorwiegendem Sommer-niederschlag und einem sekundären Niederschlagsmaximum in den Monaten Dezember/Januar (KERN 1954). Die mittleren Jahresniederschlagshöhen der Jahresreihe 1931 - 1960 sind in Abb. 2 dargestellt; sie nehmen von Süden nach Norden ab, die durchschnittlich höchsten Jahresniederschläge werden mit rd. 1100 mm im Südosten registriert, im Südwesten betragen sie etwa 950 - 1000 mm und nehmen nach Norden auf 750 - 800 mm ab. Etwa zwei Drittel der Niederschlagsmenge fällt im Sommerhalbjahr.

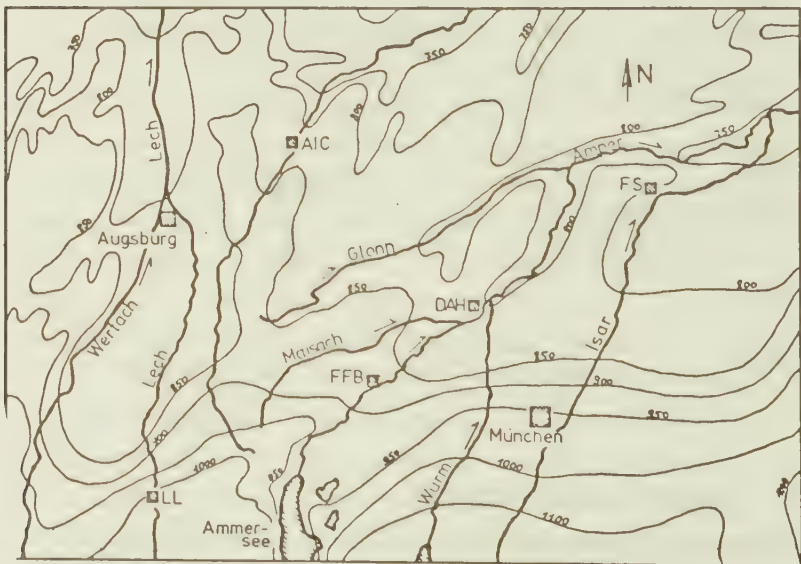


Abb. 2: Mittlere jährliche Niederschlagshöhen der Jahresreihe 1931 - 1960 (in mm) nach der Wasserwirtschaftskarte von Bayern (1971). AIC = Aichach, DAH = Dachau, FFB = Fürstenfeldbruck, FS = Freising, LL = Landsberg a. Lech. Maßstab s. Abb. 3.

Die mittleren Verdunstungshöhen (Abb. 3) liegen zwischen 600 mm im Süden und 550 mm im Norden; demnach verdunsten im Südteil zwischen rd. 55 und 70 % der Niederschläge, so daß dort noch zwischen 400 und 250 mm im Mittel für den ober- und unterirdischen Abfluß verbleiben. Im Bereich des Tertiären Hügellandes verdunsten im Mittel ca. 70 % der Niederschläge, hier verbleiben somit zwischen 200 und 250 mm Niederschlag für den gesamten Abfluß.

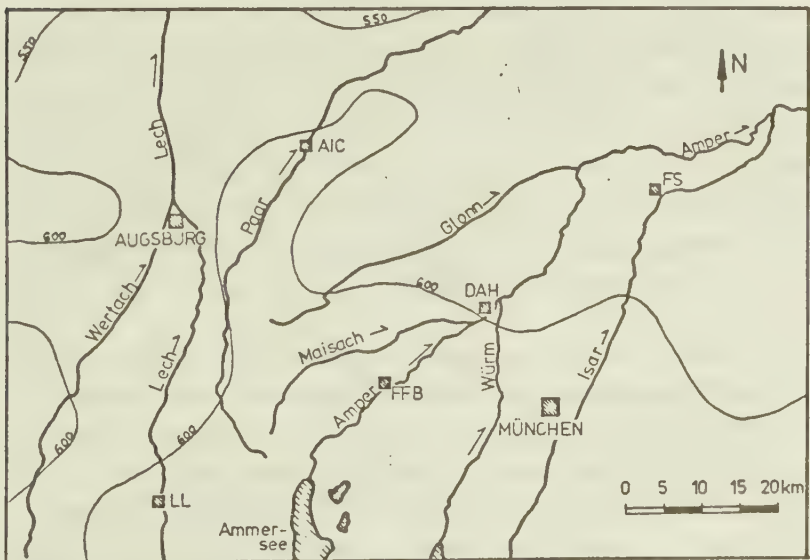


Abb. 3: Mittlere jährliche Verdunstungshöhen (in mm) der Jahresreihe 1931 - 1960 nach der Wasserwirtschaftskarte von Bayern (1971). AIC = Aichach, DAH = Dachau, FFB = Fürstenfeldbruck, FS = Freising, LL = Landsberg a. Lech.

2. Die Geologie

2.1 Die Obere Süßwassermolasse (OSM) in Bayern

Das Tertiär des Bayerischen Molassetroges besteht aus einer sich wiederholenden Abfolge von marinen, brackischen und terrestrischen

Sedimenten. Da Grundwasser zur Wasserversorgung nur aus dem oberen, jungtertiären Bereich, und hier nur aus dem oberen Abschnitt der Oberen Süßwassermolasse entnommen wird, werde ich meine hydrogeologischen Untersuchungen auf die OSM beschränken.

Vermutlich im Oberhelvet wird der Sedimentationsraum der Oberen Meeresmolasse vom offenen Meer weitgehend abgetrennt, das verbleibende Restmeer verbrackt (Oncophora-Schichten); dieser Meeresrückzug erfolgte von West nach Ost, so daß im westlichen Teil limnisch-fluviatile Sedimentationsverhältnisse herrschten, während im Ostteil noch brackische Schichten abgelagert wurden. Nach der völligen Aussüßung folgte eine Zeit limnischer und fluviatiler Ablagerungen, während der die Sedimente im wesentlichen von Osten ins Molassebecken eingeschüttet wurden. Die OSM beginnt mit limnischen Sedimenten (? Untertorton), in die vorwiegend feinkörnige, fluviatile Sande aus alpinen Liefergebieten eingeschaltet sind.

Durch Gefällsvergrößerung, verursacht wahrscheinlich durch die verstärkte Heraushebung der Ostalpen, setzte im Obertorton eine nach W bis WSW gerichtete Grobschotterschüttung ein, die bis ins untere Sarmat anhielt. Nach BLISSENBACH (1957) erfolgte die Schüttung zuerst aus dem Ennsgebiet über eine Rinne in der Gegend von Passau; es kommt zur Ablagerung des Nördlichen Vollschotters. Durch anschließende Heraushebung des Sedimentationsgebietes im unteren Sarmat (FÜCHTBAUER 1967) wird diese Ennsschüttung blockiert, die Grobsedimente werden von jetzt an durch das Salzachtor ins Molassebecken verfrachtet. Diese zweite sarmatische Schüttung folgt ab dem Salzachtor zunächst einer nordwestlichen Richtung und erodiert hier teilweise den älteren Nördlichen Vollschotter (Peracher Rinne); von Landshut an folgt die Schüttungsrichtung dann jener des Nördlichen Vollschotters, d.h. sie biegt in eine westliche

bis westsüdwestliche Schüttungsrichtung um. Der Schüttungsstromstrich verläuft nördlich von Landshut, geht nördlich an Freising vorbei und zielt auf Augsburg hin, er geht also von NE nach SW (Abb. 4).

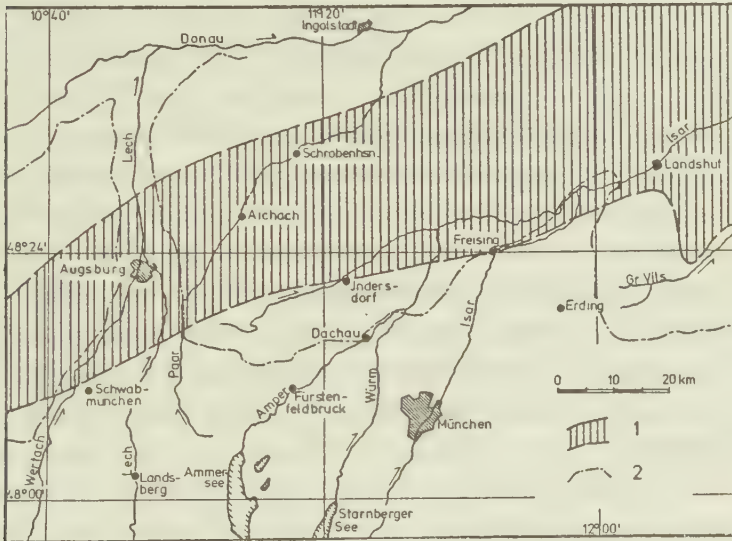


Abb. 4: Verbreitung der Hauptschotterschüttung im Untersuchungsgebiet; im Ostteil in Anlehnung an BLISSENBACH (1957).
 1 = Verbreitungsgebiet des Hauptschotters bzw. seiner Äquivalente,
 2 = Grenze des Tertiären Hügellandes

Im höheren Sarmat kommt die Sedimentation vorübergehend zum Erliegen, das bereits sedimentierte Material wird stellenweise erodiert und umgelagert. An der Wende Miozän/Pliozän setzt die Sedimentation wieder ein. Zur Ablagerung kommt jetzt eine Abfolge von Sanden, Mergeln und teilweise von Feinkiesen. Insgesamt ist die Obere Serie der OSM (s.S. 15) feinkörniger ausgebildet als die Mittlere Serie, die sog. Hauptschotterschüttung. Altersmäßig konnte in der jüngsten Abteilung der OSM Pont, also Unterpliozän, nachgewiesen werden.

Anschließend wurde das Gebiet herausgehoben und damit erneut der Erosion ausgesetzt, so daß die heutigen Mächtigkeiten der jüngsten Tertiärablagerungen nur noch Restmächtigkeiten darstellen.

Wie SCHIRM (1968) für den Bereich der Münchener Schotterebene östlich der Isar und BLASY (1974) westlich der Isar zeigten, wurde durch diese pliozäne Erosion ein ausgeprägtes Relief angelegt. Nach einer Verkippung der jungtertiären Landoberfläche mit der stärksten Heraushebung im Südwesten entsteht ein schwaches Einfallen nach Nordosten. Die jungtertiäre Oberfläche wird "in einige markante Aufragungen und Eintiefungen gegliedert, deren Richtung überwiegend zwischen SSW-NNE und W-E pendeln. Insbesondere sind sie häufig von WSW nachENE gerichtet" (SCHIRM 1968). BLASY (1974) findet ebenfalls eine "vor-rißeiszeitliche Erosionsrichtung in etwa 45 Grad Nord-Ost" in der Tertiäroberfläche angelegt. Diese Rinnen wurden dann zuerst von den pleistozänen Schmelzwässern mit Schottern aufgefüllt.

2.2 Die OSM im Arbeitsgebiet

In Anlehnung an die in Ostniederbayern anzutreffende Gliederung in liegende Süßwasserschichten, Vollschotter und Hangendserie unterteilen ABELE, FUCHS & STEPHAN (1955) die westliche bayerische Vorlandmolasse in eine Untere, Mittlere und Obere Serie.

Die Untere Serie besteht zum größten Teil aus Ton- und Sandmergeln, in die gelegentlich geringmächtige Sandschichten, teilweise auch einzelne Feinkieslagen mit gut gerundeten Quarzgeröllen eingeschaltet sind. Die Mächtigkeit dieser limnischen Serie nimmt von Norden nach Süden zu: bei Moosburg erreicht sie rd. 95 m, bei Wolnzach 110 m und wächst dann südöstlich Erding sowie bei Maisach auf 140 m und in der Bohrung Schwabmünchen 1 auf 160 m an. In der Gegend um München schließlich beträgt die Mächtigkeit der

Unteren Serie schon rd. 250 m, in der Bohrung Vaterstetten 250 m und westlich von München in der Bohrung Unterbrunn 240 m (vgl. Abb. 7).

Die Mittlere Serie führt erstmals grobkörnigere Sedimente; sie entspricht im wesentlichen der Hauptschottererschüttung, wenn auch die Korngrößen im Arbeitsgebiet kleiner sind als z. B. noch in der Landshuter Gegend.

Im nordöstlichen Gebiet um Freising und Moosburg läßt sich die Mittlere Serie noch mit dem Nördlichen und Südlichen Vollschotter aus der ostniederbayerischen Molasse korrelieren. Entsprechend der Schüttungsrichtung von ENE nach WSW nehmen nicht nur die Korngrößen ab, sondern es werden auch die einzelnen Kies- und Sandschichten nach Westen zu zunehmend geringmächtiger, während sich feinkörnige limnische Sedimente einschalten. So ist in den Bohrungen bei Moosburg noch ein ca. 45 m mächtiger Schotterkomplex erschlossen, in der Bohrung Moosinning beträgt die Mächtigkeit einer Fein- bis Mittelkiesschicht noch 30 m und in den Bohrungen um Dachau schließlich werden nur noch 25 m mächtige Fein- bis Grobsandlagen angetroffen.

Die Untergrenze der grobkörnigeren Hauptschotteräquivalente (Abb. 5) liegt bei Moosburg ca. 325 m ü. NN, bei Paunzhausen 370 m ü. NN, bei Gersthofen rd. 220 m ü. NN, bei Schwabmünchen bei 390 m ü. NN und bei Türkenfeld rd. 400 m ü. NN; in München wurden die tiefstliegenden Kiesschichten bei ca. 300 m ü. NN angetroffen.

Da im Gebiet Moosburg-Freising-Dachau die Untergrenze der Hauptschottererschüttung ziemlich einheitlich zwischen 325 m und 350 m ü. NN liegt und diese Untergrenze zudem gegen Westen ansteigen müßte, wenn man in Betracht zieht, daß im Unterpliozän eine Kippung des Molassebeckens nach NE erfolgte, so stellt sich die Frage, ob die

grobkörnigeren Schichten, die im Westteil bei 220 m ü. NN in Gersthofen und bei 290 m ü. NN in Augsburg liegen, überhaupt mit der Hauptschottererschüttung zu korrelieren sind oder ob sie nicht einem anderen, älteren Schüttungssystem zuzuordnen sind. In diesem Zusammenhang ist auch die Aussage von ABELE u. a. (1955) zu sehen, die im Bereich der Unteren Serie von einer nicht horizontbeständigen Wechsellagerung von Sanden und Mergeln sprechen, "wobei im Osten die feinkörnige, im Westen die mittelkörnige Fazies vorherrscht".

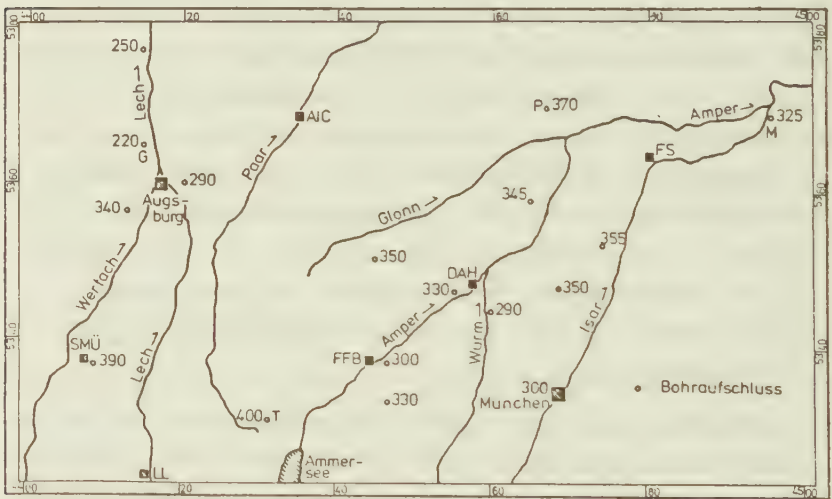


Abb. 5: Die Untergrenze der grobklastischen Äquivalente des Hauptschotters in einigen repräsentativen Bohraufschlüssen (Zahlenangaben in m ü. NN). - AIC = Aichach, DAH = Dachau, FFB = Fürstenfeldbruck, FS = Freising, G = Gersthofen, M = Moosburg, P = Paunzhausen, SMÜ = Schwabmünchen, T = Türkenfeld, LL = Landsberg a. Lech

Die Obergrenze der Hauptschotteräquivalente liegt bei Freising ca. 440 m ü. NN, bei Fürstenfeldbruck rd. 455 m ü. NN, bei Sulzemoos 453 m ü. NN, in Augsburg ca. 450 m ü. NN und in Schwabmünchen

ca. 460 m ü. NN. In München dürfte diese Obergrenze der Mittleren Serie bei einer Feinkielesschicht in ca. 400 m ü. NN, also rd. 100 - 120 m u. Gel. anzusetzen sein. Diese Grenze ist im allgemeinen markant; sie schwankt also fast nur um 450 ± 10 m ü. NN und kann in den meisten Bohrprofilen beobachtet werden.

Die Obere Serie der OSM besteht aus einer Abfolge von Sanden, Mergeln und Feinkiesen, also wieder aus feinkörnigeren Sedimenten; die Sande dieser Serie sind in der Regel feinkörniger als jene der Hauptschotterschüttung. Direkt im Hangenden der Hauptschotter kann häufig eine unterschiedlich mächtige Flinzmergelschicht beobachtet werden, die wiederum von einer Flinzsandschicht überlagert wird. Diese Abfolge ist an einigen Profilen aus dem Südrand der Hauptschotter-schüttung sehr schön zu erkennen (Abb. 6).

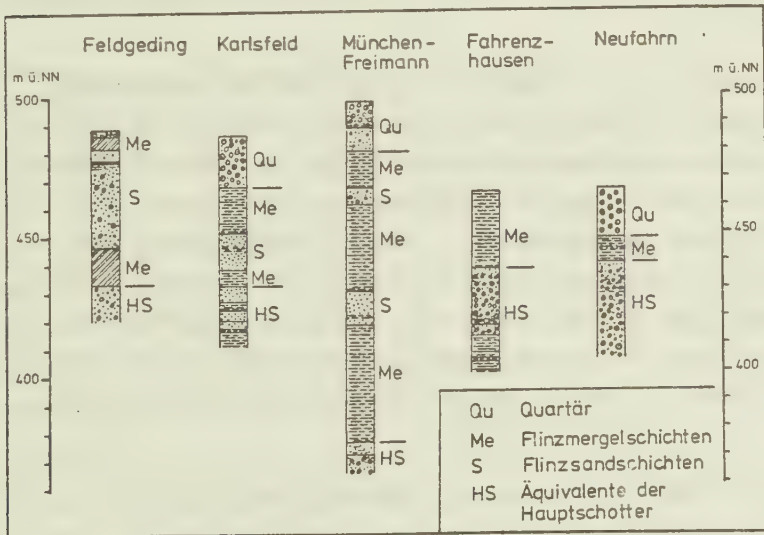


Abb. 6: Bohrprofile aus dem südlichen Randbereich der Hauptschotter-schüttung, die für den Übergang Mittlere/Obere Serie charakteristisch sind (in der Länge nicht maßstabsgetreu)

SCHIRM (1968) konnte östlich der Isar ein unruhiges Flinzmergelrelief erkennen, das durch die Auffüllung mit unterpliozänen Feinsanden ausgeglichen worden ist. Zwischen diesen beiden Schichtgliedern treten häufig Erosionsdiskordanzen auf; es ist wahrscheinlich, daß bereits vor der Sedimentation der Flinzsande durch Einwirkung von orogenetischen Vorgängen in den Alpen eine Heraushebung der Molasse stattgefunden hat, die letztlich zu einer Kippung in Richtung NE führte.

Von der Oberen Serie liegen nur noch Restmächtigkeiten vor, denn nach ihrer Ablagerung wurde diese Serie teilweise wieder erodiert. Die Restmächtigkeit dieser jüngsten tertiären Ablagerung schwankt daher auch in weiten Grenzen. Im allgemeinen wird die Obere Serie sowohl nach Westen als auch nach Süden zu mächtiger; ihre größte Mächtigkeit erreicht sie mit rd. 100 m auf der Linie München-Landsberg.

Beispielsweise sind in der Bohrung J 95 (= Bohrung München-Freimann in Abb. 6) über den Hauptschotteräquivalenten rd. 95 m Mergel und Sande der Oberen Serie erschlossen, in Brunnen 2o2 in München (s. Beil. 1) folgt über den Hauptschotteräquivalenten eine 83,6 m mächtige Mergelabfolge, in die nur untergeordnet Flinzsande eingelagert sind und darüber eine 15,9 m mächtige Flinzsand-schicht. Dagegen erschließt eine 1977 bei Feldgeding, westlich Dachau abgeteufte Brunnenbohrung (s. Abb. 6) über dem Hauptschotter nur noch 13,3 m Flinzmergel und darüber ca. 35 m Flinzsande.

2.2.1 Die Korngrößen der Kies- und Sandfraktion

Allgemein nehmen die Korngrößen des Hauptschotters von Ost nach West und auch nach Süden gegen die jeweiligen Ränder des Schüt-tungssystems zu ab. In den Bohrprofilen sind meistens nur Anga-ben allgemeiner Art (Feinkies, sandig u. ä.) enthalten, Korngrößen-

angaben in mm sind selten. In den Bohrungen Moosinning ist eine ca. 9 m mächtige Quarzkiesschicht mit Geröllgrößen zwischen 2 und 20 mm im Hauptschotter enthalten; in den Bohrungen im Großraum von München werden Quarzkiese vor allem in den Schichten zwischen etwa 370 und 340 m ü. NN, sowie zwischen 305 und 280 m ü. NN angetroffen. Ihre durchschnittliche Korngröße liegt im Fein- bis Mittelkiesbereich mit Geröllgrößen bis zu 15 mm, selten werden Gerölle von 20 mm, in einem Fall sogar bis zu 30 mm Korndurchmesser angetroffen.

Bei Augsburg sind die Korngrößen im Durchschnitt kleiner als in München; meistens liegen sie im Sandbereich, mit maximalen Werten in der Grobsand-, seltener auch in der Feinkiesfraktion. In der Bohrung Schwabmünchen 1 wurde als Maximalkorndurchmesser 3,5 mm gefunden.

2.3 Lagerung der OSM und ihre Restmächtigkeit

Strukturell bildet die OSM eine asymmetrische Mulde, deren nördlicher Flügel im Untersuchungsgebiet zwischen Freising und Augsburg mit ca. 5 ‰ nach Süden einfällt, während der Südflügel wesentlich steiler nach Norden einfällt, zum Teil sogar bis zur Saigerstellung aufgeschleppt sein kann (LEMCKE 1973). Die Entstehung der Mulde führt LEMCKE auf Einengung in Zusammenhang mit dem alpinen Deckenschub zurück. Die Muldenachse verläuft ENE - WSW und taucht mit ca. 3 ‰ nach WSE ab (s. Abb. 7).

Die größten Restmächtigkeiten der OSM sind im südwestlichen Teil des Untersuchungsgebiets anzutreffen: Bohrung Utting erreicht bei einer Teufe von ca. 750 m die brackischen Oncophoraschichten; abzüglich der quartären Überdeckung von 25 m ist die erhaltene Gesamtmächtigkeit der OSM hier 725 m. Utting 1 liegt etwa im Bereich der Muldenachse. Im Muldenachsenbereich nimmt die Mäch-

tigkeit der OSM nach Osten rasch ab; so durchteuft z. B. die Bohrung Zorneding 1 nur noch 424 m Obere Süßwassermolasse.

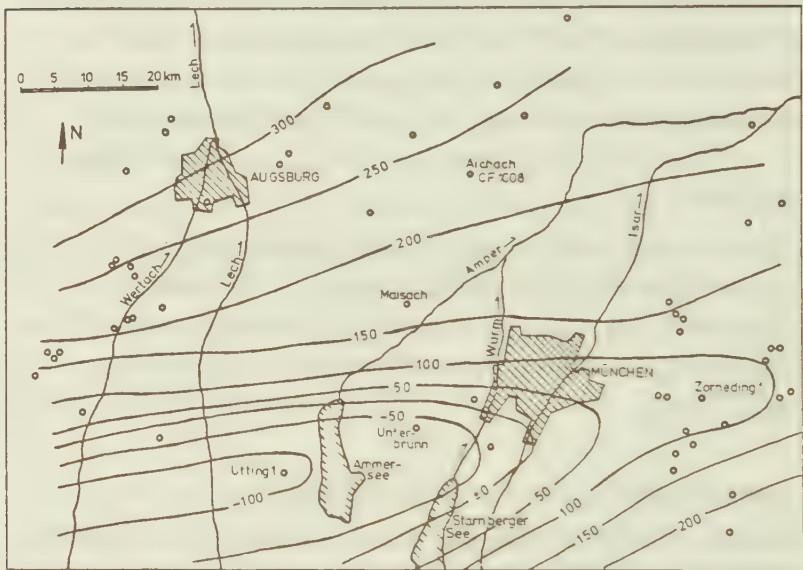


Abb. 7: Streichlinienkarte (m über/unter NN), bezogen auf die Basis der OSM (nach Bohrunterlagen des Bayerischen Oberbergamtes, München⁺). Die Kreissignaturen bedeuten Bohraufschlüsse; namentlich sind nur die im Text erwähnten Bohrungen aufgeführt.

Nach Norden nimmt die Restmächtigkeit der OSM ebenfalls rasch ab. Während sie bei Unterbrunn noch ca. 440 m beträgt, ist sie in der Bohrung Maisach auf rd. 300 m, in der Bohrung Aichach CF 1008 auf 260 m und in Dillingen 1 auf lediglich 67 m Mächtigkeit abgefallen (Abb. 8).

⁺) Für die Einsicht und die Erlaubnis zur Auswertung der Bohrprofile möchte ich mich bei Herrn Oberbergdirektor Eldracher, Bayer. Oberbergamt bedanken.

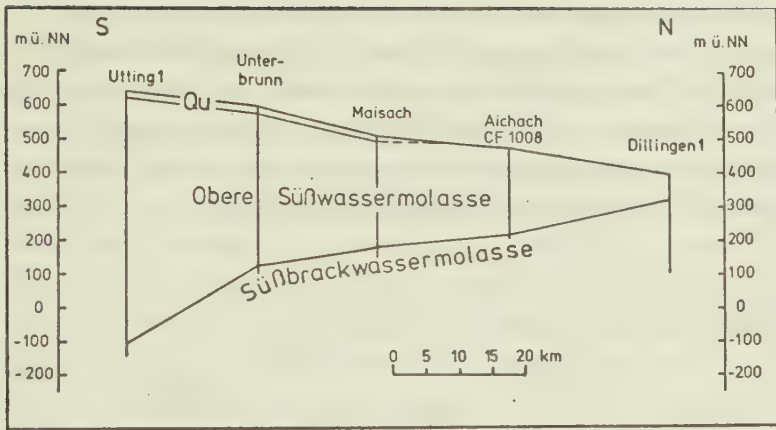


Abb. 8: Die Restmächtigkeit der OSM, dargestellt an einem schematischen Süd-Nord-Profil zwischen den Bohrungen Utting 1 und Dillingen 1 (Qu = Quartär)

3. Die Hydrogeologie des Untersuchungsgebietes

3.1 Hydrogeologischer Überblick

Grundwasser findet sich in erschließenswerten Mengen vor allem in den kiesigen und sandigen Schichten der Mittleren und Oberen Serie der OSM. Solche gröberkörnigen Schichten sind häufig als synsedimentäre Aufarbeitungslagen mit einer scharfen Untergrenze über feinklastischen Sedimenten erschlossen; zum Hangenden hin werden sie feinkörniger und gehen in Form eines "graded bedding" in Feinklastika über. Derartige Grobkornlagen wirken gleichsam wie Drainagehorizonte für die feinkörnigeren Schichten im Liegenden und Hangenden, d.h. es sind in ihnen höhere Fließgeschwindigkeiten und ein stärkerer Grundwasserandrang zu erwarten.

Bedingt durch die limnisch-fluviatile Sedimentation der Oberen Süßwassermolasse tritt eine starke fazielle Verzahnung von durchlässigen und

weniger durchlässigen Sedimenten in vertikaler wie in horizontaler Richtung auf. Wie wenig horizontbeständig die grundwasserführenden Schichten sind, wird aus einer Zusammenstellung von einigen Bohrprofilen aus der Gegend von Fürstenfeldbruck ersichtlich (Abb. 9). Ein Grundwasserstockwerksbau, der sich über größere Entfernungen verfolgen läßt, kann demnach nicht erwartet werden.

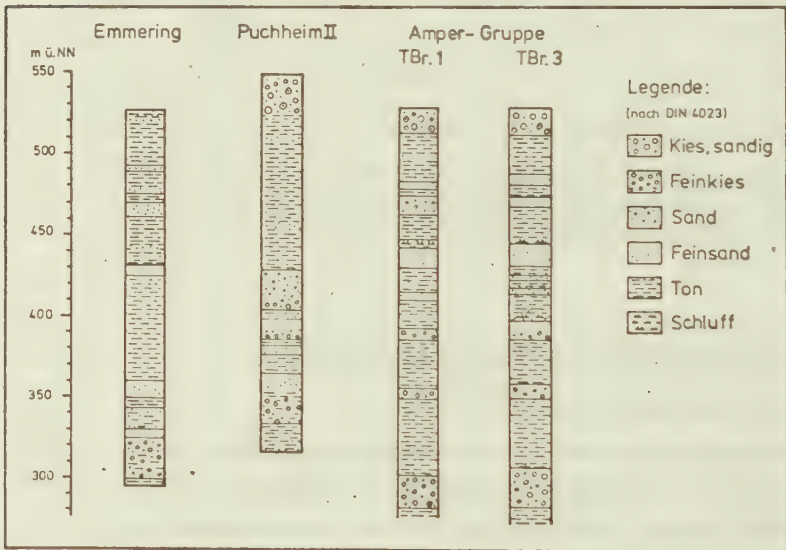


Abb. 9: Bohrprofile aus dem jungtertiären Grundwasserleiter im Raum Fürstenfeldbruck (Länge nicht maßstabsgetreu)

Dagegen können für Einzelgebiete Tiefenbereiche ausgeschieden werden, in denen durchlässigere Schichten mit einer hohen Wahrscheinlichkeit zu erwarten sind. TRAUB (1956) nennt in München "hauptsächlich zwei derartige Tiefenwasserstockwerke, die jedoch nicht überall gleichmäßig vorhanden sind und stellenweise fehlen können, ein oberes in etwa NN + 445 bis 480 m, also rd. 40 bis 80 m unter Gelände und ein tieferes in NN + 300 bis 320 m, also rd. 200 bis 220 m

unter Gelände." Inzwischen wurde aber im Stadtgebiet eine Reihe von weiteren Tiefbrunnen ins Jungtertiär abgeteuft, so daß sich die Aussage TRAUBs noch erweitern bzw. differenzieren läßt: es werden in München grundwasserführende Schichten am häufigsten zwischen 480 und 435 m ü. NN, 400 und 365 m ü. NN, 340 und 300 m ü. NN sowie 285 und 270 m ü. NN angetroffen. Für Augsburg sind nach ANDRES & PFEIFFER (1956) drei besonders ergiebige wasserführende Horizonte feststellbar: in etwa 470 bis 455 m ü. NN, 420 bis 395 m ü. NN und 335 bis 305 m ü. NN. Die wasserführenden Horizonte haben in München und in Augsburg etwa gleiche Mächtigkeit und gleiche Höhenlage (m ü. NN). Der tiefstgelegene wasserführende Horizont in München in 285 bis 270 m ü. NN ist aus Augsburger Bohrungen nicht bekannt, da ihn bisher noch keine Bohrungen erschlossen haben; nur in den Bohrungen Gersthofen X und XI und in der Bohrung Langweid, alle nördlich von Augsburg gelegen, ist er angedeutet.

Die Mächtigkeit des jungtertiären Grundwasserleiters, nämlich der vertikale Abstand zwischen Grundwassersohlschicht und der Deckschicht des obersten grundwasserführenden Horizonts, beträgt in München maximal 210 m (von 40 bis 250 m unter Gelände). Nach Westen verringert sich die Gesamtmächtigkeit auf rd. 180 m bei Fürstenfeldbruck und 140 m bei Schwabmünchen. In Augsburg beträgt die genutzte Mächtigkeit 165 m, weiter nördlich zwischen 160 m in Meitingen und 195 m in Gersthofen.

Im Gebiet des Tertiären Hügellandes zwischen Isar/Amper, im Lechtal und im nordöstlichen Teil der Münchener Schotterebene sind durch Brunnenbohrungen lediglich 50 bis 100 m des tertiären Grundwasserleiters erschlossen. Hier liegt das Verbreitungsgebiet des Hauptschotters und es wird bereits mit geringen Brunnentiefen genügend viel Grundwasser angetroffen (s. 3. 3).

Das Grundwasser in den jungtertiären Schichten ist in der Regel ge-

spannt; lediglich dort, wo das oberste tertiäre Grundwasser mit dem quartären Grundwasser in hydraulischem Kontakt steht, wird ein freier Grundwasserspiegel angetroffen. Im übrigen stellen sich je nach der Tiefenlage der grundwasserführenden Schicht unterschiedliche Druckspiegel ein; diese liegen in der Regel um so tiefer, je tiefer unter Gelände die wasserführende Schicht liegt. Werden durch Brunnen mehrere Horizonte erschlossen, so ist eine Absenkung des Ruhewasserspiegels des obersten Grundwasserstockwerks zu beobachten (s. auch 3.2). Diese Erscheinung ist sehr wahrscheinlich auf Druckverluste zurückzuführen, die durch den hydraulischen Kurzschluß, den eine Bohrung auslöst, verursacht werden.

3.2 Grundwasserdruckspiegel und -höhengleichen

3.2.1 Druckspiegelschwankungen

Kontinuierliche Aufzeichnungen über das Verhalten des Grundwasserdruckspiegels des jungtertiären Grundwassers existieren nur für wenige Beobachtungsstellen, die dann auch nur die jeweils oberste grundwasserführende Sandschicht im Jungtertiär erfassen. In diesen oberflächennahen Schichten machen sich Niederschlagsereignisse mit einer zeitlichen Verzögerung und einer deutlichen Dämpfung in einem Grundwasseranstieg bemerkbar.

Der Landesgrundwasserdienst des Bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft betreut u. a. zwei Pegel im Englischen Garten in München. Im Pegel E 1 sind Feinsande aus 14.2 bis 22.3 m u. Gel. erfaßt, im Pegel E 2 eine Fein- bis Mittelsandschicht in einer Tiefe von 5.4 bis 8.2 m u. Gel. Die Druckspiegelschwankungen im Zeitraum von November 1972 bis Oktober 1975 liegen beim Pegel E 1 zwischen 505.15 m und 505.58 m ü. NN und beim Pegel E 2 zwischen 504.86 m und 505.25 m ü. NN; höchster und tiefster Wasserstand liegen in diesem Zeitraum nur 43 bzw. 39 cm auseinander.

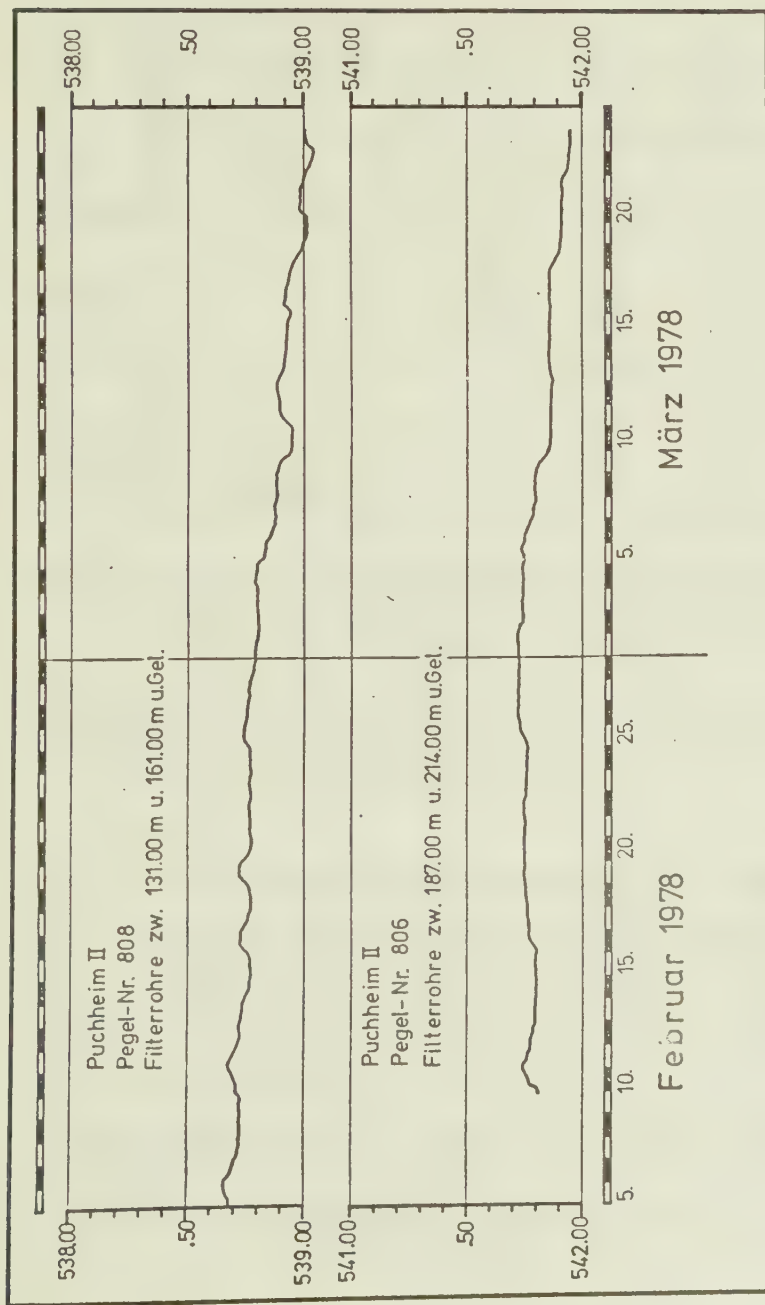


Abb. 10: Druckspiegelschwankungen im jungtertiären Grundwasserleiter, dargestellt an den Ganglinien zweier verschieden tiefer Pegel in der Grundwassererkundungsbohrung Puchheim II

Bei der Grundwassererkundungsbohrung Puchheim II wurden erstmals Schreibpegel installiert, die die Druckspiegelschwankungen im Grundwasser auch aus tieferliegenden Schichten aufzeichnen. In dem einen Pegel werden Sande und Feinkielesschichten in 118,8 m bis 164,0 m u. Gel. mit Filterstrecken von 131,0 m bis 141,0 m und von 156,0 m bis 161,0 m u. Gel. erfaßt, in dem zweiten überwiegend Sandschichten aus 183,7 m bis 215,5 m u. Gel. mit Filterstrecken von 187,0 m bis 192,0 m und von 204,0 m bis 214,0 m u. Gel. (s. auch Abb. 18). Die beiden Schichtserien sind durch ein ca. 20 m mächtiges Tonpaket voneinander getrennt. Der Druckspiegel aus dem unteren Filterbereich liegt um rd. 3 m tiefer als jener aus dem höherliegenden. Obwohl in den beiden Beobachtungspegeln 806 und 808 voneinander getrennte Tiefenbereiche des Jungtertiärs mit unterschiedlichen Grundwasserdruckspiegeln erschlossen sind, verlaufen die Druckspiegelschwankungen in dem kurzen Beobachtungszeitraum in beiden Pegeln gleichsinnig (Abb. 10). Es muß demnach hier ein zusammenhängender Grundwasserkörper vorliegen, der über die gesamte Mächtigkeit des Aquifers auf Druckschwankungen hydraulisch einheitlich reagiert. Diese Beobachtung sollte durch weitere kontinuierliche Pegelmessungen in anderen Pegeln jungtertiärer Brunnen bestätigt werden.

3.2.2 Höhengleichen des jungtertiären Grundwassers

Die Druckspiegel des jungtertiären Grundwassers stellen sich bei Druckentlastung je nach der Tiefe des erschlossenen Wassers auf unterschiedliche Niveaus ein. Ausschlaggebend dafür ist die Tiefenlage der erbohrten grundwasserführenden Schicht unter der Geländeoberfläche: je tiefer unter Gelände sie liegt, desto niedriger ist an dieser Stelle das hydraulische Potential und damit die Höhe des Ruhewasserspiegels im entspannten Zustand (Abb. 11). Die Steighöhen dieses gespannten Grundwassers nehmen dagegen mit zunehmender Tiefenlage der grundwasserführenden Schicht zu.

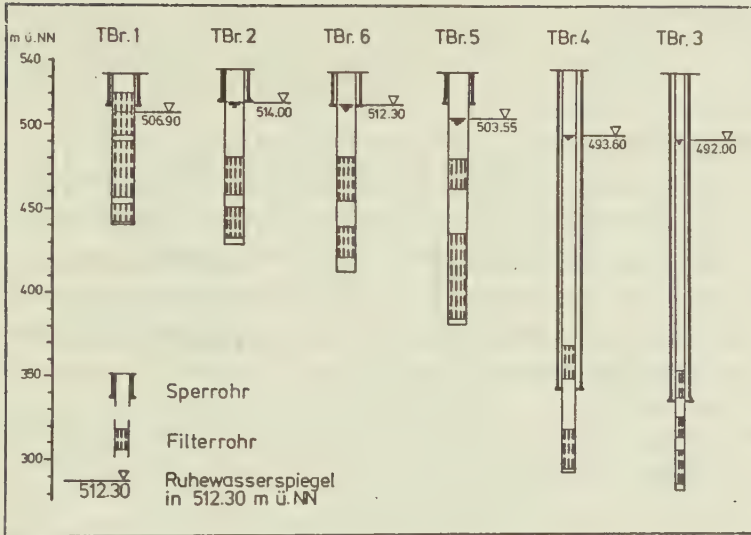


Abb. 11: Entlastete Druckspiegel nahe zusammenliegender, aber verschieden tiefer Brunnen (Brunnen J 77 bis J 82 aus dem Stadtgebiet München) Längen nicht maßstabsgetreu)

Im allgemeinen liegen die Druckspiegel tiefer als der ungespannte Grundwasserspiegel im quartären Grundwasserleiter; nur in seltenen Fällen kann der Druckspiegel auch einmal höher liegen.

Für ungefähr gleiche Tiefenlagen der wasserführenden, jungtertiären Schichten fallen die Druckspiegel gegen Norden hin ab, in allen Schichten kann also ein Potentialgefälle von Süd nach Nord beobachtet werden. Wenn im Bereich des Tertiären Hügellandes zwischen Moosburg, Aichach und Schrobenhausen das jungtertiäre Grundwasser teilweise artesisch gespannt ist, so hängt dies hier mit dem tiefen Erosionsniveau im Tertiär zusammen.

Aus den Ruhewasserspiegeln aller erfaßten Brunnen mit einer Tiefe zwischen etwa 50 m und 160 m, in denen das Quartär und die oberen grundwasserführenden Flinzsande durch Sperrohre abgesperrt sind, wurden Grundwasserhöhengleichen konstruiert. Selbstverständlich

mußten dabei Vereinfachungen gemacht werden, da streng genommen solche Isolinien nur tiefenbezogen Gültigkeit besitzen; in den meisten Brunnen sind jedoch mehrere Grundwasser"stockwerke" erfaßt, so daß der eingemessene Ruhewasserspiegel ein Ausgleichsdruckspiegel ist, der sich in Abhängigkeit vom Grundwasserzustrom und -abstrom in den einzelnen Filterbereichen einstellt. Eine weitere Fehlerquelle bei dieser Konstruktion liegt darin, daß die Wasserspiegelmessungen aus einem Zeitraum von über 10 Jahren stammen und daß dabei Spiegelschwankungen, die im Dezimeter- bis Meterbereich liegen können, unberücksichtigt bleiben mußten.

Die Isolinienkarte (Beil. 2) ist demnach, was die absoluten Grundwasserhöhenangaben betrifft, mit kleinen Fehlern behaftet. Hinlänglich genau sind jedoch einige allgemeine Tatsachen festzustellen:

- generell fließt das jungtertiäre, gespannte Grundwasser in einer Tiefe zwischen 50 m und 160 m von Süden nach Norden; eine Extrapolation der Höhengleichen nach Norden zu ergibt als Vorflut die Donau bzw. die Grenzlinie der Molasse zum unterlagernden Malm (LEMCKE 1977).
- Die Flüsse im Tertiärhügelland stellen in der Regel für das Grundwasser aus der genannten Tiefe keine Vorflut dar. Dagegen können die Ruhewasserspiegel des Grundwassers aus den obersten Flinzsanden noch eine deutliche Beziehung zu den nächstgelegenen Flüssen und Bächen als Vorfluter aufweisen, wie dies ULBRICH (1973) und SALAMEH (1974) aufgezeigt haben.
- Die nach Süden gerichteten Ausbuchtungen der Grundwasserhöhengleichen in den Räumen München und Augsburg werden durch die dortigen starken Grundwasserentnahmen bedingt.

Diese Feststellungen machen deutlich, daß das jungtertiäre Grundwasser in Tiefen zwischen 50 m und 160 m von Süd nach Nord fließt

und auf diesem Fließweg auch Vorfluter quert, besser gesagt unterfließt. Nur das oberflächennahe Grundwasser des Jungtertiärs steht örtlich in Wechselwirkung mit Vorflutern.

3.2.3 Grundwasserfließrichtung und -gefälle

Westlich der Paar ist der jungtertiäre Grundwasserstrom ziemlich genau nach Norden gerichtet; um Augsburg ist durch die stärkere Grundwasserentnahme ein weit nach Norden reichender Absenkbereich erzeugt worden, der sich bis ca. 20 km Grundwasserstromabwärts auswirkt. Im südlichen, ungestörten Teil beträgt das Grundwasser-gefälle etwa 3.5 bis 4.5 ‰ und versteilt sich unmittelbar südlich von Augsburg infolge der großräumigen Absenkung auf über 1 ‰. Dagegen ist es westlich und östlich von Augsburg, wo sich die Grundwasserspiegelsenkung nicht mehr auswirkt, mit 2 bis 3 ‰ wieder geringer; hier machen sich anscheinend die etwas höheren durchschnittlichen k_f -Werte (s. S. 42) in einer Gefällsverflachung bemerkbar.

Vom Nordende des Ammersees in Richtung Friedberg läßt sich ziemlich deutlich eine Grundwasserscheitelzone verfolgen, die die Fließrichtungen im Westteil des Arbeitsgebietes von jenen im Ostteil trennt; ungefähr ab Mering verläuft diese etwas unschärfer in nordöstliche Richtung und liegt hier etwa zwischen Paar und Glonn. In ihrem südlichen und mittleren Abschnitt ist die Fließrichtung des jungtertiären Grundwassers nach Nordosten gerichtet, im Nordteil - nördlich der Glonn - biegt sie mehr in nördliche bis nordöstliche Richtung um. Auch hier ist das Gefälle im Süden mit 4 bis 5 ‰ höher als im Mittelteil (1.5 - 3 ‰).

Östlich der Paar fließt das Grundwasser in nordöstliche Richtung. Da hier durch die stärkere Grundwasserentnahme im Raum München der Verlauf der Grundwasserhöhengleichen verzerrt wird, können keine Gefällswerte für den ungestörten Fall angegeben werden.

Im Großraum München macht sich wieder die stärkere Grundwasserförderung auf den Isohypsenverlauf bemerkbar (Abb. 12). Durch das dichtere Beobachtungsnetz erscheint der Isolinienvverlauf differenzierter und es scheinen sich mehrere Bereiche größerer Absenkung abzuzeichnen, deren Senkungstrichter sich gegenseitig überlappen. Auch hier ist die Isar für diesen Teil des "tiefen" Grundwassers kein Vorfluter.

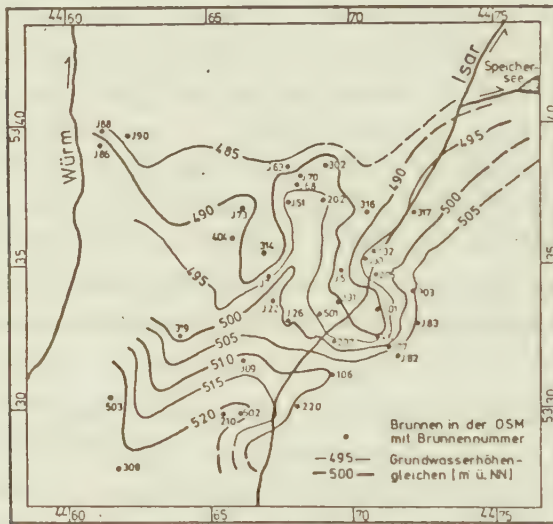


Abb. 12: Grundwasserhöhengleichen des jungertären Grundwassers im Stadtgebiet München (aus Tertiärbrunnen, die aus 50 bis 160 m u. Gel. Grundwasser fördern).

3.3 Die Wasserwegsamkeit der Sedimente der OSM

3.3.1 Die Ergiebigkeit des Aquifers

Die Ergiebigkeit von Bohrbrunnen in Lockergesteinen hängt vom geologischen Aufbau des Aquifers, von der Wasserwegsamkeit der grundwasserführenden Schichten als einer Funktion der Kornzusammensetzung

zung, des Gefüges und der Porosität und nicht zuletzt auch vom Brunnenausbau selbst ab.

Je nach der Ausbildung und der Mächtigkeit der wasserführenden Schichten und nach der Anzahl der vom Brunnen erfaßten, besonders wasserwegsamem Horizonte schwankt die Ergiebigkeit von Bohrbrunnen im jungtertiären Aquifer zwischen wenigen l/s und über 100 l/s. Die größten Ergiebigkeiten werden im Bereich der Hauptschotterschüttung bzw. ihrer Äquivalente in der westlichen Fortsetzung der Hauptschotterschüttung erzielt. Bei Bohrtiefen zwischen 80 m und 150 m im östlichen Teil des Arbeitsgebietes, d. i. in der Gegend von Freising und Dachau, werden bei einer Brunnentiefe von ca. 50 bis 140 m durchschnittlich zwei bis fünf sandige oder kiesige Schichten mit einer Mächtigkeit von zusammengekommen bis etwa 60 m erschlossen; die Pumpversuche erbrachten Ergiebigkeiten bis maximal 140 l/s (Oberschleißheim) bei Absenkungsbeträgen zwischen 11 und 37 m ab Ruhewasserspiegel. In der westlichen Fortsetzung der Hauptschotterschüttung nehmen die Ergiebigkeiten geringfügig ab und es werden zunehmende Bohrtiefen nötig, um noch 50 bis 85 l/s fördern zu können (Tab. 1).

In Augsburg können mit Brunnentiefen bis zu 90 m durchschnittlich 12,5 l/s, mit Tiefen zwischen 120 und 190 m bis zu 65 l/s gefördert werden. Allerdings sind nicht alle tieferen Tertiärbrunnen so ergiebig: so sind mindestens drei über 150 m tiefe Brunnen bekannt, die weniger als 10 l/s bringen. Dies zeigt schon, wie der Grundwasserleiter über relativ kurze Entfernungen in seinem geologischen Aufbau und in seiner Wasserwegsamkeit starke Unterschiede aufweisen kann.

Gegen den Südrand des zentralen Schüttungsbereiches zu nehmen die Ergiebigkeiten schnell ab: in München-Freimann, Karlsfeld und München-Allach beträgt die Ergiebigkeit bei Bohrtiefen zwischen

130 und 250 m noch bis zu 50 l/s, im Stadtgebiet von München sind so hohe Ergiebigkeiten die Ausnahme. Mit 250 m Bohrtiefe werden dort noch zusammengenommen etwa 40 bis 60 m Sand- und vereinzelt Feinkiesschichten angetroffen, die durchschnittlich ca. 30 l/s erbringen; aus nur 100 m tiefen Brunnen, die aus der feinkörniger ausgebildeten Feinflinzserie Grundwasser entnehmen, können noch 10 l/s gefördert werden, in wenigen Ausnahmefällen bis zu 20 l/s.

3.3.2 Die spezifische Ergiebigkeit

Die spezifische Ergiebigkeit E ist als die Wassermenge definiert, die aus einem Brunnen in der Zeiteinheit je 1 Meter Absenkung des Ruhewasserspiegels entnommen werden kann:

$$E = \frac{Q}{s} \quad (l/s \cdot m)$$

mit: Q = Entnahmemenge in l/s

s = Absenkung des Ruhewasserspiegels in m bei der Entnahmemenge Q

Sie wird aus der sog. Leistungscharakteristik, d.i. das Entnahme-Absenkungsdiagramm, abgeleitet.

Für gespanntes Grundwasser ist die Leistungscharakteristik eine Gerade; wird der Ruhewasserspiegel unter die (stauende) Grundwasserdeckschicht abgesenkt, wird also der Wasserspiegel frei, so geht die Gerade in eine nach oben konvexe Parabel über. Im Untersuchungsgebiet sind die meisten Leistungscharakteristiken diesen beiden Gruppen zuzuordnen, wobei der Fall des gespannten Grundwasserspiegels überwiegt (Abb. 13 a und b).

Daneben tritt eine weitere Art der Leistungscharakteristik auf, die als Sonderfall eines gespannten Grundwasserspiegels bezeichnet werden kann: bei zunehmender Fördermenge nimmt die Absenkung nicht mehr linear oder parabolisch zu, sondern die Entnahme-Ab-

Tab. 1: Ergiebigkeit Q, spezifische Ergiebigkeit E, Absenkung s und Gesamtmächtigkeit M aller wasserführenden Kies- und Sandschichten im Bereich der HauptschotterSchüttung

Brunnen	Br. - tiefe	Q (l/s)	E (l/s · m)	s (m)	wasserführ. Schichten von - bis	
					M (m)	
Oberding	142	100	3.77	26.50	35 - 138	88
Moosinning	107	33	1.80	17.80	43 - 104	40
Freising	84	75	2.85	26.20	32 - 81.5	
Freising-Süd I	115	63	5.92	10.70	37 - 110	53
II	114	109	10.03	10.90	27 - 107	53.5
III	113	100	2.70	37.00	30 - 107	65
Fahrenzhausen	136	55	3.88	14.20	28 - 122	
Oberschleißheim	134	140	4.80	29.50	30 - 128	52
Freimann	250	45	2.09	21.50	66 - 244	60
Karlsfeld	212.5	35	1.55	22.60	46 - 210	
Dachau 6	108	67	2.42	27.70	43 - 108	50
5	118	30	1.57	19.10	40 - 118	60
4	138	32	1.86	17.20	32 - 138	50
3a	110	121	4.39	27.50	45 - 110	
7	94	39	1.31	29.70	57 - 94	30
Allach 3	130	36.5	2.70	13.50	51 - 126	48
4	142.5	46	1.88	25.10	45 - 128	46
5	138.5	50	2.80	17.85	44 - 139	66
Feldgeding	132	45	2.69	18.25	71 - 127	56
Sulzemoos	150	45	2.03	22.00	37 - 145	35
Amper-Gr. 1	262.5	80	1.90	42.95	84 - 246	58
2	261.5	70	1.20	57.26	78 - 244	76
3	261.5	70	1.25	55.18	84 - 247	66
Emmering	235	30	1.81	26.95	54 - 233	42
Friedberg	129	65	2.10	31.15	21 - 130	67
Meitingen	187	80	1.35	42.30	58 - 184	60
Herbertshofen	187	65	1.56	40.50	43 - 186	86
Langweid	216.5	65	1.61	37.50	38 - 212	121
Gersthofen	253	82	2.04	36.10	53 - 247	125
Augsburg (Prinz)	189	65	1.50	40.50	66 - 185	62
Augsburg 1	200	70	1.29	42.70	86 - 198	60
Schwabmünchen	170	50	1.36	34.70	82 - 167	54

senkungskurve ist nach unten gekrümmt (Abb. 13 c). Wie es zu dieser Erscheinung in dem jungtertiären Porengrundwasserleiter kommt, ist noch nicht geklärt.

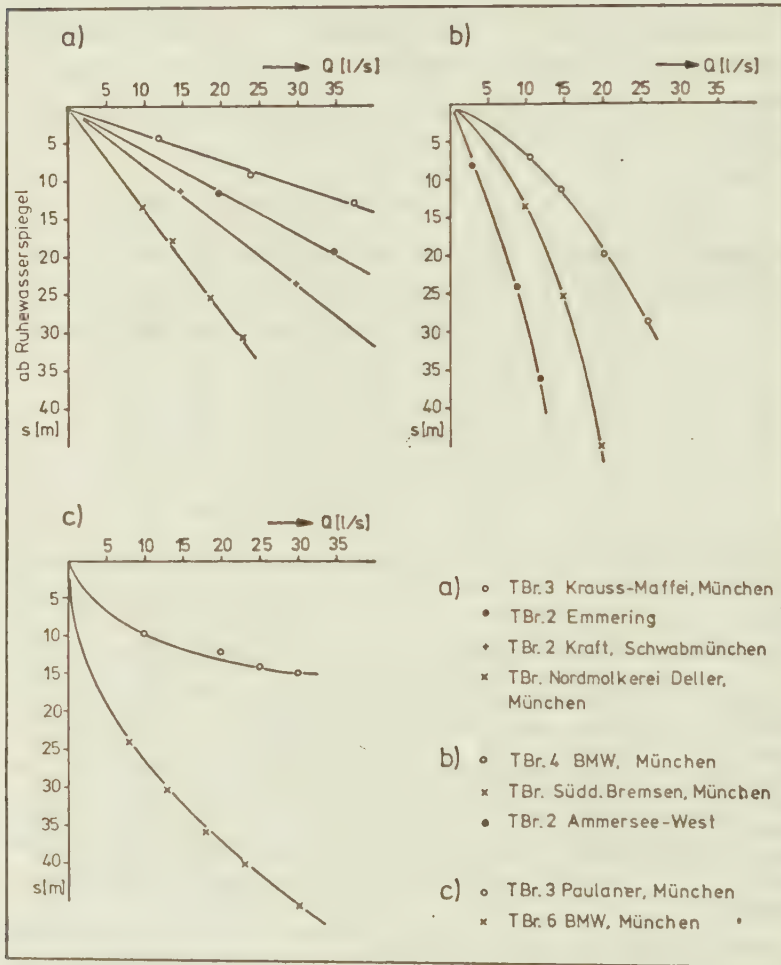


Abb. 13: Typische Leistungscharakteristiken von Brunnen aus der Oberen Süßwassermolasse (Erklärung im Text)

Die statistische Auswertung der Häufigkeitsverteilung von 185 spezifischen Ergiebigkeiten zeigt im Bereich von $E = 0,2$ bis $2,0 \text{ l/s}\cdot\text{m}$ ein ausgeprägtes Maximum (Abb. 14). Eine eingehende Analyse dieser Häufigkeitsverteilung macht regionale Unterschiede sichtbar: im Südteil des Arbeitsgebietes treten überwiegend die niedrigeren spezifischen Ergiebigkeiten (E-Werte) unter $1 \text{ l/s}\cdot\text{m}$ auf; im Stadtgebiet München z. B. liegen 75 % der E-Werte zwischen $0,2$ und $1,0 \text{ l/s}\cdot\text{m}$. In Augsburg dagegen liegt das Maximum zwischen 1 und $1,5 \text{ l/s}\cdot\text{m}$ und im Tertiären Hügelland zwischen Isar und Lech zwischen 1 und $2 \text{ l/s}\cdot\text{m}$. Ins Tertiäre Hügelland fallen auch die Extremwerte mit $10 \text{ l/s}\cdot\text{m}$ im Tiefbrunnen II des Zweckverbandes Freising-Süd und mit $20,6 \text{ l/s}\cdot\text{m}$ im Tiefbrunnen I der Gemeinde Paunzhausen.

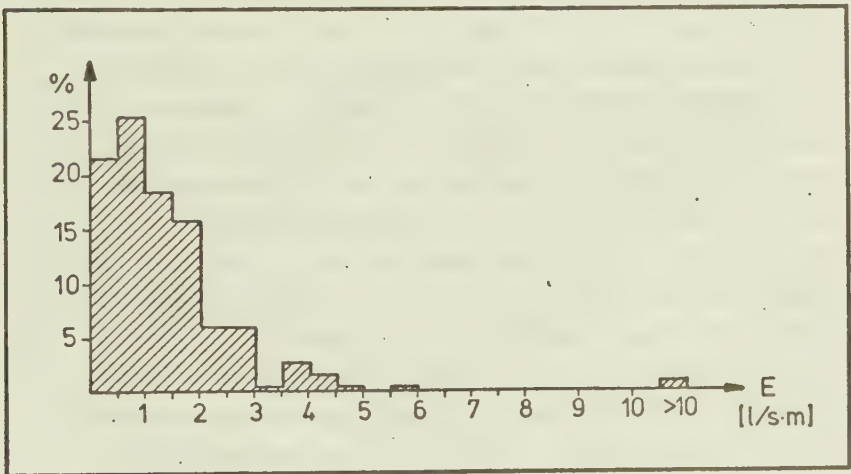


Abb. 14: Häufigkeitsverteilung der spezifischen Ergiebigkeiten des jungtertiären Grundwasserleiters im Großraum München - Augsburg

Werden die spezifischen Ergiebigkeiten dicht beieinanderliegender Brunnen miteinander verglichen, so läßt sich erkennen, daß bei verschieden tiefen Brunnen der tiefere Brunnen eine deutlich höhere spe-

zifische Ergiebigkeit aufweist (z. B. Fahrenzhausen: Tiefbrunnen I - 79,5 m tief, $E = 1,61 \text{ l/s} \cdot \text{m}$; Tiefbrunnen II - 136 m tief, $E = 3,88 \text{ l/s} \cdot \text{m}$ oder Emmering: Tiefbrunnen I - 56 m tief, $E = 0,26 \text{ l/s} \cdot \text{m}$; Tiefbrunnen II - 230 m tief, $E = 1,57 \text{ l/s} \cdot \text{m}$). Daraus ist zu folgern, daß in den jungtertiären Lockergesteinen über die gesamte durch die Brunnen erschlossene Profiltiefe und besonders auch in den oberen Schichten keine sekundäre Gefügauflockerung als Folge von Verwitterungs- und Entlastungsvorgängen bis zu Tiefen von 200 - 250 m erkennbar ist.

3.3.3 Ermittlung der Durchlässigkeiten aus Pumpversuchen

Aus insgesamt 178 Pumpversuchsergebnissen aus dem Untersuchungsgebiet konnten die Durchlässigkeitsbeiwerte k_f der jungtertiären Feinsande und Kiese ermittelt werden. Da bei allen Pumpversuchen lediglich die Entnahmemenge und die dazugehörigen Absenkungsbeträge im Förderbrunnen selbst vorliegen, darüber hinaus jedoch keine weiteren Beobachtungen des räumlichen und zeitlichen Verhaltens der Absenkung an Beobachtungsepegeln im Umkreis des Förderbrunnens vorgenommen worden sind, konnten die Durchlässigkeitsbeiwerte nur nach den THIEM-DUPUITschen Annahmen, also für stationäre Verhältnisse, ermittelt werden. Obwohl sich der Gültigkeitsbereich der THIEM-DUPUITschen Annahmen nur auf vollkommene Brunnen erstreckt und die Brunnen in der OSM nach der Definition unvollkommene Brunnen sind, kann m. E. die Auswertung von Pumpversuchen aus Brunnen in der OSM so erfolgen, als handle es sich um vollkommene Brunnen, weil die Brunnen entweder in die feinklastische Untere Serie oder aber, wenn sie nicht so tief sind, in mächtigere, sehr geringdurchlässige Mergelschichten einbinden. Dadurch wird ein nahezu horizontales Anströmen der Filterstrecken über die gesamte Aquifermächtigkeit gewährleistet, so daß in hydraulischer Hinsicht ähnliche Verhältnisse wie bei vollkommenen Brunnen herrschen.

Danach gilt für gespanntes Grundwasser die Beziehung

$$Q = \frac{2 \pi \cdot k_f \cdot M \cdot (H-h)}{\ln \frac{R}{r}} \quad (\text{m}^3/\text{s})$$

bzw. aufgelöst nach k_f :

$$k_f = \frac{Q}{2 \pi \cdot M \cdot (H-h)} \cdot \ln \frac{R}{r} \quad (\text{m/s})$$

mit: Q = Entnahmemenge in m^3/s ,
 M = Mächtigkeit des Grundwasserleiters in m,
 H = Höhe des Grundwasserdruckspiegels über der Grundwassersohlschicht in m,
 h = Höhe der Druckwassersäule über der Grundwassersohlschicht bei der Entnahmemenge Q in m,
 R = Reichweite des Absenkttrichters in m,
 r = Bohrlochradius in m.

Um diese Gleichung nach k_f zu lösen, sind alle Größen bis auf R bekannt bzw. meßbar. Für die Reichweite R des Absenkttrichters muß daher ein angenommener Wert eingesetzt werden. Da R jedoch nur als Logarithmus in die Rechnung eingeht, wird der Fehler, der sich durch diese Annahme ergeben kann, klein. Ich habe $R = 1000$ m gesetzt; ist z. B. die tatsächliche Reichweite nur halb so groß, ergibt sich ein relativer Fehler von ca. 8 %.

Für Pumpversuche, die mit verschiedenen Entnahmemengen gefahren werden, gibt BIESKE (1973) folgende Lösung an:

$$k_f = \frac{(q_2 - q_1) \cdot \ln R/r}{2 \pi \cdot M \cdot (h_1 - h_2)} \quad (\text{m/s});$$

in grober Näherung kann $\ln R/r$ gleich 2π gesetzt werden, so daß sich die Gleichung vereinfacht zu:

$$k_f = \frac{q_2 - q_1}{M \cdot (h_1 - h_2)} \quad (\text{m/s})$$

mit: q_1 und q_2 : Entnahmemengen in m^3/s ,
 h_1 und h_2 : Höhe der Druckwassersäule im Förderbrunnen bei den Entnahmen q_1 bzw. q_2 in m,
 M : Mächtigkeit des Grundwasserleiters in m.

Die so ermittelten k_f -Werte stellen Mittelwerte über die jeweilige verfilterte Mächtigkeit des Grundwasserleiters dar.

Die Streuung der aus Pumpversuchen errechneten k_f -Werte ist überraschend gering; sie umfaßt nur zwei Größenordnungen mit den Eckwerten $2 \cdot 10^{-6}$ m/s und $2 \cdot 10^{-4}$ m/s. Allein 40 % der berechneten k_f -Werte liegen im Intervall zwischen 1 und $3 \cdot 10^{-5}$ m/s. Dies dürfte hauptsächlich darauf zurückzuführen sein, daß beim Brunnenausbau die Lage der Filterstrecken bereits so ausgewählt worden ist, daß jeweils nur die kiesigen und sandigen Schichten für die Grundwasserförderung erschlossen wurden.

Die Häufigkeitsverteilung der k_f -Werte für das Gesamtgebiet, sowie unterteilt in die Bereiche Stadtgebiet München, Stadtgebiet Augsburg und Gebiet zwischen Isar und Lech ist in Abb. 15 dargestellt. Das Hauptmaximum von $1 - 3 \cdot 10^{-5}$ m/s tritt in allen drei Teilgebieten auf; doch unterscheidet sich das Gebiet München von den beiden anderen Bereichen dadurch, daß hier besonders häufig Abweichungen zu niedrigeren k_f -Werten auftreten, während in den anderen Gebiets teilen die ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte eher zu höheren k_f -Werten, bis hin zu $2 \cdot 10^{-4}$ m/s abweichen.

Die so gewonnenen k_f -Werte stellen jeweils Mittelwerte über den verfilterten Teil des Grundwasserleiters dar. Da die Durchlässigkeiten von Ton- und Mergelschichten, die mit verfiltert wurden, jedoch als vernachlässigbar klein gegen die der kiesigen und sandigen Bereiche angesetzt werden können, erhöhen sich die Durchlässigkeitsbeiwerte, wenn nur die Sand- und Kiesschichten als Grundwasserzuflußflächen betrachtet werden.

Die folgende Überlegung geht davon aus, daß sich die Transmissivität $T (= k_f \cdot h)$ eines Grundwasserleiters mit Schichten unterschiedlicher Durchlässigkeit aus der Summe der Teiltransmissivitäten der verschiedenen durchlässigen und verschiedenen mächtigen

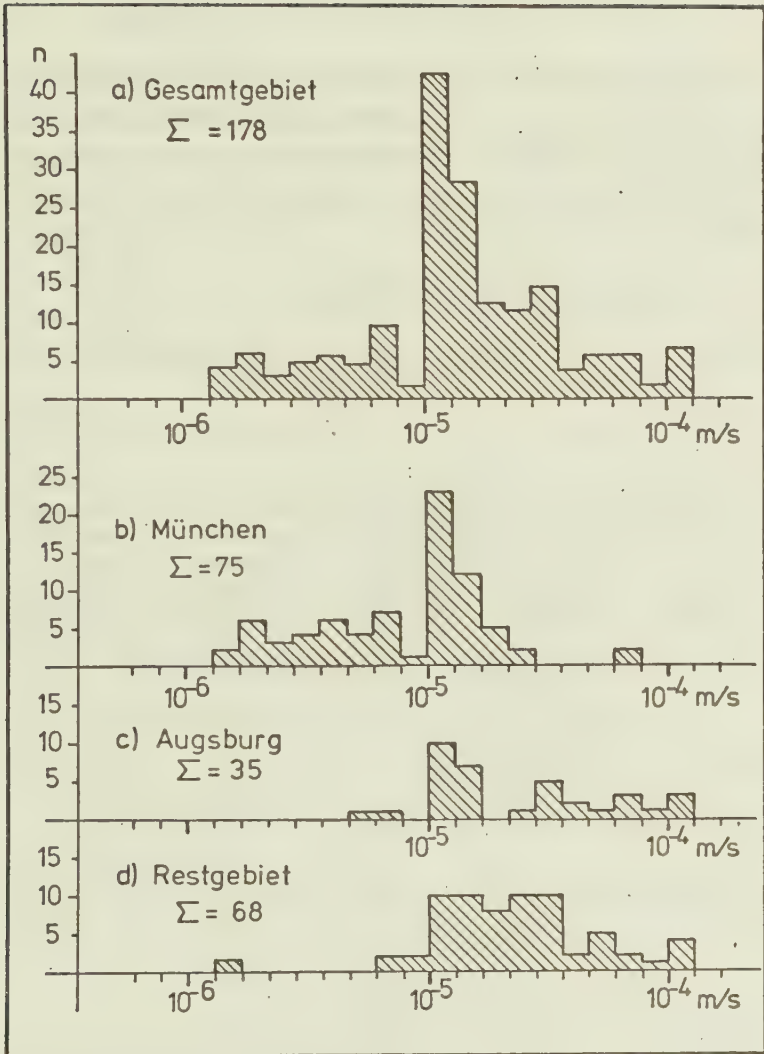


Abb. 15: Häufigkeitsverteilung der aus Pumpversuchen ermittelten k_f -Werte (Auswertung nach THIEM-DUPUIT für stationäre Verhältnisse)

Schichtglieder zusammensetzt:

$$T = k_{f1} \cdot h_1 + k_{f2} \cdot h_2 + \dots + k_{fn} \cdot h_n;$$

da aber die k_f -Werte der Ton- und Mergelschichten sicher kleiner als 10^{-8} m/s sind, können sie gegenüber den Durchlässigkeiten in den kiesigen und sandigen Schichten vernachlässigt werden und man kann die mittleren k_f -Werte für die grobkörnigeren Bereiche berechnen:

$$T = (k_f \cdot h)_{\text{Sand}} + (k_f \cdot h)_{\text{Ton}}.$$

Da aber $(k_f \cdot h)_{\text{Ton}} = 0$ gesetzt werden kann, folgt daraus:

$$k_{f \text{ Sand}} = k_{f \text{ ges.}} \cdot \frac{h_{\text{ges.}}}{h_{\text{Sand}}} \quad (\text{m/s})$$

mit: $k_{f \text{ Sand}}$ = k_f -Wert, wenn als Mächtigkeit des Grundwasserleiters nur die kiesig-sandigen Schichten gerechnet werden (in m/s),

$k_{f \text{ ges.}}$ = k_f -Wert, wie er im Pumpversuch über die Gesamtmächtigkeit des Aquifers ermittelt wird (in m/s),

h_{Sand} = Mächtigkeit aller vom Brunnen durchteuften Kies- und Sandschichten (in m),

$h_{\text{ges.}}$ = Gesamtmächtigkeit des Grundwasserleiters (in m).

Damit erhält man die Durchlässigkeitsbeiwerte für die wasserwegsameren kiesigen und sandigen Bereiche; sie liegen im Intervall zwischen $8 \cdot 10^{-6}$ m/s und $7 \cdot 10^{-4}$ m/s, d.h. sie sind gegenüber den Durchlässigkeitsbeiwerten für die gesamte Filterstrecke 4-fach höher.

3.3.4 Im Labor ermittelte k_f -Werte

Aus der im Untersuchungszeitraum im Auftrag des Bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft abgeteuften Grundwassererkundungsbohrung 14.06 Puchheim II wurden aus verschiedenen Bohrtiefen

Spülproben entnommen und im Labor ihre Durchlässigkeitsbeiwerte k_f bestimmt, um diese Werte mit den Pumpversuchsergebnissen vergleichen zu können.

Außer den Spülproben aus der Grundwassererkundungsbohrung wurden weitere 80 (gestörte) Bodenproben aus Tagesaufschlüssen im Tertiären Hügelland im Raum Freising - Dachau entnommen und untersucht; bei der Probennahme wurde Wert darauf gelegt, daß die entnommenen Proben für den jeweiligen Aufschluß repräsentativ sind und aus einheitlichen Schichten stammen. Dieses Untersuchungsprogramm sollte später einmal auf weitere Teile des Tertiären Hügellandes ausgedehnt werden.

3. 3. 4. 1 Untersuchungsmethoden

Die gestört entnommenen Proben wurden unter Wasser in einen Probenzylinder (Abb. 16) eingeschüttet und durch Hammerschläge auf die Außenwand des Zylinders soweit wie möglich verdichtet. Um Ausspülungen des Feinstkorns zu verhindern, ist das Probenvolumen oben und unten mit jeweils einer Siebplatte abgedeckt. Für den Versuchsablauf kann der Zufluß Q von entlüftetem Wasser, das die Probe von unten nach oben durchfließt, mit einem Ventil geregelt werden.

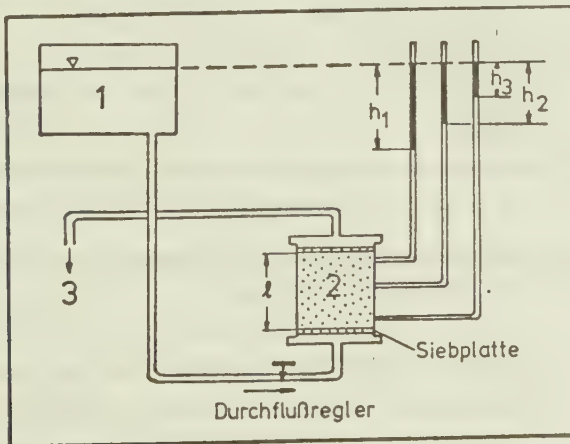


Abb. 16: Meßanordnung zur Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwerts im Labor

1 = Wasserbehälter, 2 = Probenvolumen,
3 = Abfluß zum Vorratsbehälter

Die Standrohrspiegelhöhen h können für jede Durchflußmenge an einer Meßharfe abgelesen werden. Bei bekannter Durchflußfläche F und Durchflußhöhe l läßt sich der Durchlässigkeitsbeiwert k_f nach

$$k_f = \frac{Q \cdot l}{F \cdot h} \quad (\text{m/s})$$

errechnen.

3.3.4.2 Untersuchungsergebnisse

Aus der Grundwassererkundungsbohrung Puchheim II wurden 11 Spülproben aus Teufenabschnitten zwischen 127,5 m und 214 m u. Gel. entnommen. Es treten darin alle Übergänge von schluffigen Feinsanden über kiesige bis schluffige Mittel- bis Grobsande zu kiesigen Sanden auf (Abb. 17).

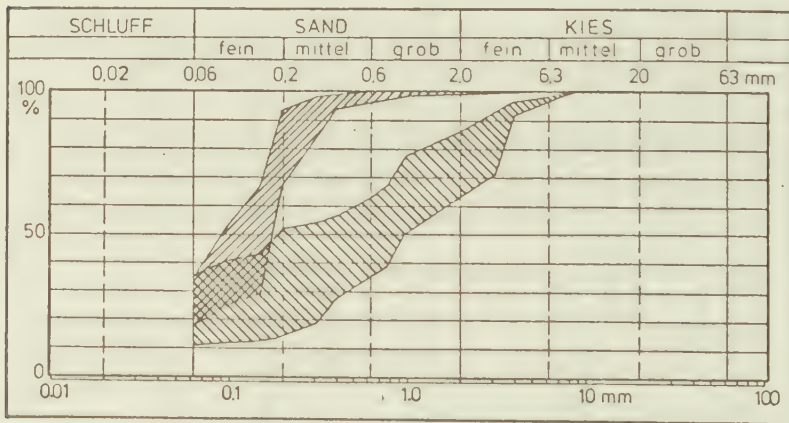


Abb. 17: Kornverteilungsband der Spülproben aus der Grundwassererkundungsbohrung Puchheim II

Die bei den Laborversuchen ermittelten k_f -Werte liegen zwischen $1,1 \cdot 10^{-7}$ m/s und $5,2 \cdot 10^{-4}$ m/s, der arithmetische Mittelwert liegt bei $5,7 \cdot 10^{-5}$ m/s. Im einzelnen können die Werte der Tabelle 2 entnommen werden.

Diese Durchlässigkeiten zeigen eine deutliche Abhängigkeit vom Verlauf der Korn summenkurven: Feinsande mit kleinem Ungleichförmigkeitsgrad (Abb. 17) besitzen ähnliche Durchlässigkeiten wie kiesige Mittel- bis Grobsande (Abb. 17), sie sind beide durchlässiger als schluffig-kiesige Sande bzw. stark sandige und kiesige Schluffe.

Um die Aussagekraft dieser Laborergebnisse für die Durchlässigkeiten in der Natur zu prüfen, wurden sie mit den beim Pumpversuch in der Bohrung Puchheim II ermittelten k_f -Werten verglichen. Der Pumpversuch wurde in zwei Abschnitten gefahren: zuerst wurde mit drei Förderstufen (10 - 20 - 30 l/s) über die gesamte Filterstrecke abgepumpt; dabei wurde nach THIEM-DUPUIT ein mittlerer Durchlässigkeitsbeiwert von $1,4 \cdot 10^{-5}$ m/s ermittelt. Anschließend wurde der Bereich unterhalb ca. 164 m unter Flur durch einen Packer abgesperrt und nur im oberen Bereich Grundwasser entnommen: hier ergab sich ein geringfügig höherer k_f -Wert von $4 \cdot 10^{-5}$ m/s. Zum besseren Verständnis sind das geologische Kurzprofil und der Brunnenausbau zur Zeit des Pumpversuchs in Abb. 18 dargestellt. Auf der rechten Seite der Abb. 18 ist die jeweilige Entnahmetiefe durch einen dicken senkrechten Strich und der Betrag der im Labor ermittelten k_f -Werte durch horizontale Strichlängen eingetragen. Wie der Vergleich mit dem Brunnenausbau verdeutlicht, entspricht der Entnahmebereich der Spülproben exakt dem verfilterten Bohrlochbereich, so daß die im Pumpversuch und die im Labor ermittelten Durchlässigkeiten direkt vergleichbar sind.

Da die beim Pumpversuch ermittelten k_f -Werte Mittelwerte über das getestete und verfilterte Vertikalprofil darstellen, die im Labor ermittelten Werte dagegen nur für den eng begrenzten Entnahmebereich Gültigkeit haben, was sich auch in ihrer Schwankungsbreite über drei Größenordnungen ausdrückt, wurden zum besseren Vergleich die aus $T = k_{fi} \cdot h_i$ errechneten Transmissivitäten der Laborwerte den Trans-

missivitäten im Pumpversuch gegenübergestellt. Wie das Ergebnis von $T = 1,17 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ (Labor) zu $T = 1,32 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ (Pumpversuch) beweist, entsprechen sich die nach den beiden Methoden ermittelten k_f -Werte recht gut und dürften somit den tatsächlichen Verhältnissen im Gelände recht nahe kommen.

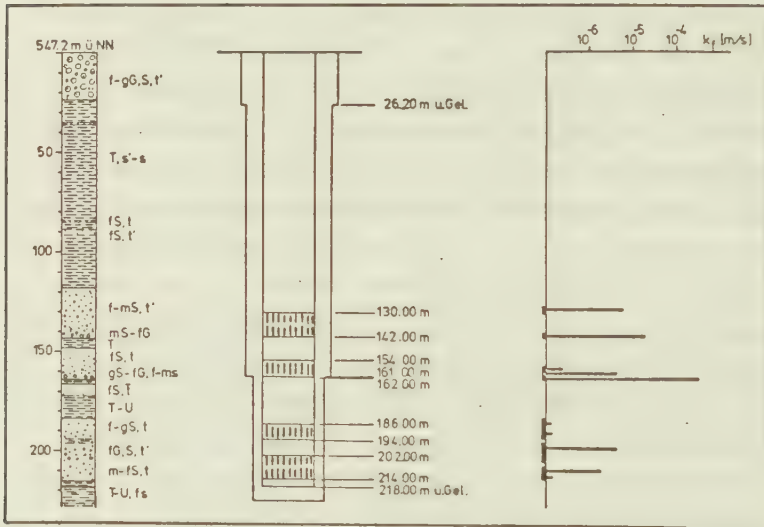


Abb. 18: Geologisches Kurzprofil, Brunnenausbau und Durchlässigkeitsbeiwerte k_f in verschiedenen Tiefen der Grundwasser-erkundungsbohrung Puchheim II

Außer den Spülproben wurden aus dem anstehenden Jungtertiär weitere gestörte Proben entnommen und im Labor auf ihren k_f -Wert untersucht. Die Probennahmestellen sind in der Grundlagenkarte (Beil. 1) eingetragen. Bei der Probennahme wurde bevorzugt sandiges und kiesiges Probenmaterial entnommen.

Die Ergebnisse wurden gebietsweise zusammengefaßt. Dabei deutet sich an, daß die mittleren k_f -Werte umso größer werden, je näher am Stromstrich der Grobschotterschüttung die Entnahmestelle der Proben liegt. Aus einem Aufschluß einer Autobahnbaustelle bei

Tabelle 2: Durchlässigkeitsbeiwerte (k_f) und Kornkennzahlen (d_{10} , d_{60} und Ungleichförmigkeitsgrad U) von Bodenproben aus dem Jungtertiär im Raum München - Augsburg. (Su in der Spalte d_{10} bedeutet, daß über 10 Gewichtsprozent im Schluffbereich liegen)

Probenbezeichnung	mittl. Geländehöhe (m ü. NN)	d_{10} (mm)	d_{60} (mm)	U	k_f Labor (m/s)	k_f HAZEN (m/s)
Puchheim 2	418	Su	0,18	-	$7,5 \cdot 10^{-6}$	-
3	405	Su	1,1	-	$2,7 \cdot 10^{-5}$	-
4	388	Su	0,13	-	$3,3 \cdot 10^{-7}$	-
5	386	Su	0,58	-	$6,3 \cdot 10^{-6}$	-
6	384	Su	1,8	-	$5,2 \cdot 10^{-4}$	-
7	362	Su	0,7	-	$1,1 \cdot 10^{-7}$	-
8	357	Su	0,65	-	$1,5 \cdot 10^{-7}$	-
9	349	Su	1,1	-	$6,1 \cdot 10^{-6}$	-
10	343	Su	0,22	-	-	-
11	337	Su	0,19	-	$2,6 \cdot 10^{-6}$	-
12	334	Su	0,55	-	$1,1 \cdot 10^{-7}$	-
Eching 1	460	0,13	3,2	24,6	$2,7 \cdot 10^{-4}$	-
2	460	0,26	2,8	10,8	$8,6 \cdot 10^{-4}$	-
3	461	0,28	3,2	11,4	$2,3 \cdot 10^{-3}$	-
4	464	0,22	5,1	23,2	$4,6 \cdot 10^{-4}$	-
6	465	0,08	0,19	2,3	$2,2 \cdot 10^{-4}$	$8,2 \cdot 10^{-5}$
7	465	0,17	0,30	1,8	$2,8 \cdot 10^{-4}$	$3,3 \cdot 10^{-4}$
8	468	0,24	3,4	14,2	$1,5 \cdot 10^{-3}$	-
10	470	0,17	0,86	5,1	$1,9 \cdot 10^{-4}$	$3,3 \cdot 10^{-4}$
11	471	0,08	0,20	2,5	$7,0 \cdot 10^{-5}$	$7,4 \cdot 10^{-5}$
12	471	0,25	0,53	2,1	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$7,2 \cdot 10^{-4}$
17	475	0,11	0,19	1,7	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$
22	483	0,074	0,19	2,6	$5,7 \cdot 10^{-5}$	$6,3 \cdot 10^{-5}$

Eching wurden aus 24 Proben k_f -Werte zwischen $2,5 \cdot 10^{-3}$ m/s und $1,3 \cdot 10^{-6}$ m/s bestimmt, in der Gegend von Allershausen dagegen aus 14 Proben Durchlässigkeiten zwischen $4 \cdot 10^{-3}$ m/s und $3 \cdot 10^{-5}$ m/s; die arithmetischen Mittelwerte der Durchlässigkeiten liegen bei Eching bei ca. $3 \cdot 10^{-4}$ m/s und bei Allershausen bei $9 \cdot 10^{-4}$ m/s, also um rund eine halbe Größenordnung höher.

Soweit der Ungleichförmigkeitsgrad dieser Proben unter 5 lag, wurde der Durchlässigkeitsbeiwert k_f auch nach HAZEN

$$k_f = 0,0116 \cdot d_{10}^2 \quad (\text{m/s})$$

berechnet (s. Tab. 2). Die HAZEN-Durchlässigkeiten stimmen recht gut mit den Laborwerten überein.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß die Durchlässigkeitsbeiwerte innerhalb einzelner Schichtglieder auf Grund unterschiedlichster Einflüsse, wie Korngrößenverteilung, Kornform, Gefüge und Ungleichförmigkeitsgrad recht beträchtlich voneinander abweichen können. Im einzelnen wurden k_f -Werte zwischen ca. 10^{-7} m/s und 10^{-3} m/s bestimmt.

Es kann aber auch gezeigt werden, daß die Mittelwerte der Durchlässigkeiten, wie sie aus Labor- und aus Pumpversuchen bestimmt wurden, in erstaunlich engen Grenzen schwanken, nämlich im Bereich von nur zwei Größenordnungen zwischen 10^{-6} m/s und 10^{-4} m/s mit einem ausgeprägten Maximum bei $1 - 3 \cdot 10^{-5}$ m/s.

3.4 Transmissivität

Nach DIN 4049 (Teil 22, Gelbdruck) ist die Transmissivität als Integral der Durchlässigkeit über die Grundwassermächtigkeit definiert. Sie ist eine Maßzahl für die Abflußrate in einem Einheitsquerschnitt über die gesamte Höhe H des Aquifers bei einem hydraulischen Gradienten von 1; sie stellt somit einen wesentlich

besseren Kennwert für die Ergiebigkeit eines Grundwasserleiters dar als z. B. der k_f -Wert.

LOGAN (1964) gibt für stationäre Strömung in gespannten Grundwasserleitern ein Näherungsverfahren zur Berechnung der Transmissivitäten aus Pumpversuchen an, das auf den THIEMschen Annahmen beruht; demnach ist die Transmissivität

$$T = \frac{2,30 \cdot Q \cdot \log R/r}{2 \pi \cdot s} \quad (\text{m}^2/\text{s})$$

mit: R = Reichweite des Absenkungstrichters in m;
 r = Radius des Pumpbrunnens in m,
 Q = Entnahme aus dem Förderbrunnen in m^3/s ,
 s = maximale Absenkung im Förderbrunnen in m.

Da bei unseren hydrologischen Aufschlüssen im Jungtertiär Pegelrohre zur Ermittlung der Reichweite R durchwegs fehlen, kann in grober Näherung $\log R/r = \pi$ gesetzt werden, so daß sich die Gleichung vereinfacht zu:

$$T = \frac{1,22 \cdot Q}{s} \quad (\text{m}^2/\text{s}).$$

Demnach ist die Transmissivität der spezifischen Ergiebigkeit proportional.

Die aus den Pumpversuchsdaten errechneten Transmissivitäten für die Mittlere und Obere Serie der OSM schwanken zwischen $0,20 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ und $12,23 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. In ihrer regionalen Verteilung sind sie in Abb. 19 dargestellt. Für die Stadtgebiete von München und Augsburg wurden in der Abbildung jeweils die Mittelwerte eingesetzt: in München $1,05 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ aus 77 Einzelwerten der Transmissivität zwischen $0,20 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ und $4,75 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, in Augsburg $1,65 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ als Mittelwert aus 25 Transmissivitätswerten zwischen $0,39 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ und $2,97 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$.

Aus der regionalen Verteilung können nach Abb. 19 zwei Bereiche verschieden hoher Transmissivität unterschieden werden, die über einen Streifen, der etwa ENE - WSW südlich von Freising über Dachau nach Schwabmünchen verläuft, ineinander übergehen. Ähnlich der regionalen k_f -Wert-Verteilung kommt auch hier der Zusammenhang zwischen der geologischen Ausbildung und der Ergiebigkeit des Aquifers zum Ausdruck: die höheren Transmissivitätswerte liegen im nördlichen Bereich, also im Verbreitungsgebiet der Grobschotterschüttung bzw. ihrer Äquivalente in der westlichen Molasse; im Süden, wo insgesamt feinkörnigeres Sediment überwiegt, sind von einigen Ausnahmen abgesehen die Transmissivitäten geringer.

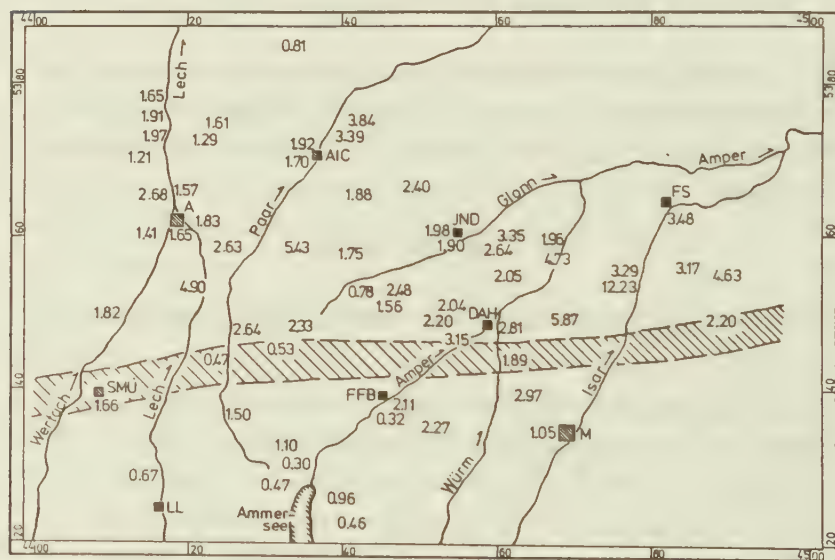


Abb. 19: Transmissivitäten des jungtertiären Grundwasserleiters zwischen Isar und Lech; die Transmissivitäten beziehen sich nur auf die Mittlere und Obere Serie der OSM. Zahlenangaben in $10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. - A = Augsburg, AIC = Aichach, DAH = Dachau, FS = Freising, JND = Indersdorf, LL = Landsberg a. Lech, M = München
schraffierter Streifen = Grenzbereich zwischen den Gebieten hoher und niedriger Transmissivitäten

Geht man von den auf S. 27 ermittelten durchschnittlichen Gefällswerten von 2 - 3 ‰ für das Gebiet um München und Augsburg aus, so läßt sich aus diesen Transmissivitätswerten ein Durchfluß von ca. 2 - 3 l/s pro Kilometer Aquiferbreite für München und von 3 - 5 l/s und Kilometer Aquiferbreite im Raum Augsburg errechnen. Im Freisinger Raum wächst diese Durchflußmenge bei dem zusätzlich auch noch größeren Gefälle von 3,5 bis 4 ‰ auf ungefähr 40 bis 50 l/s je Kilometer Aquiferbreite an. Durchschnittlich errechnet sich für das nördliche Gebiet bei mittleren Transmissivitäten von $0,003 \text{ m}^2/\text{s}$ bis $0,005 \text{ m}^2/\text{s}$ ein Durchfluß von 10 bis 20 l/s auf einen Kilometer Durchflußbreite bei einer maximalen Aquifermächtigkeit von rd. 150 m.

Auf Grund dieser Durchflußdaten kann die derzeitige Gesamtfördermenge von rd. $2,7 \text{ m}^3/\text{s}$ im Stadtgebiet München bzw. rd. $1,3 \text{ m}^3/\text{s}$ im Stadtgebiet Augsburg unmöglich allein aus dem von Süden kommenden, horizontalen Zufluß im Jungtertiär stammen; es muß hier folglich noch eine andere, wohl vertikale Zuflußkomponente vorhanden sein. Wie wir aus den Ergebnissen der Hydrochemie, der Tritium- und der ^{14}C -Messungen sehen werden, erfolgt ein beträchtlicher Anteil an der Grundwasserneubildung im Tertiär von den wasserwegsameren quartären Terrassenschottern im Bereich der Münchener Schotterebene her. Dieser Anteil der Grundwasserneubildung gelangt anscheinend auf "kurzem" Wege zu den Wasserfassungen im Tertiär.

Aber auch im Tertiären Hügelland muß in der OSM der horizontale Zufluß aus dem Süden (s. auch 3.2.2 und Beil. 2) durch einen Anteil von an Ort und Stelle neugebildetem Grundwasser erhöht werden, sonst könnten hier keine höheren Durchflüsse als im Süden registriert werden.

3.5 Porosität

Grundwasserbewegung findet innerhalb eines Sedimentkörpers im nutzbaren oder effektiven Porenhohlraum statt. Dieser ist definiert als der Teil der Gesamtporosität abzüglich des in sich geschlossenen Porenhohlraums. Bei klastischen Sedimenten ist die Nutzporosität abhängig von der Korngröße (DAVIS & DE WIEST 1966), von der Ungleichförmigkeit, der Lagerungsdichte und der Kornform. Nach DAVIS & DE WIEST (1966) ist normalerweise die Nutzporosität in Grobsanden und kiesigen Sanden am größten.

Die Flinzsande sind von ihrer petrographischen Zusammensetzung her glimmerhaltige bis glimmerreiche Quarzsande mit einem untergeordneten Feldspatanteil. Die Quarzkörner sind in der Mittel- und Grobsandfraktion gut kantengerundet, in der Feinsandfraktion dagegen weisen sie einen geringeren Rundungsgrad auf und meist sind sie splittrig. Die Glimmerplättchen bilden zwischen den einzelnen Quarzkörnern geradezu Gefügebrücken, die eine dichte Lagerung der Quarze verhindern und auf diese Weise eine außerordentlich hohe Gesamtporosität der Flinzsande entstehen lassen. Zudem erhöht die geringere Kornrundung in der Feinsandfraktion sogar die Porositäten gegenüber den Mittel- und Grobsanden. SALAMEH (1974) beispielsweise konnte an Flinzsanden, die er aus dem anstehenden Tertiär zwischen Amper und Paar entnommen hatte, Gesamtporositäten von 45 bis 51 % bestimmen.

Am Institut für Radiohydrometrie der Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung sind an Sandproben aus dem Raum Dachau nutzbare Porositäten zwischen ca. 41 und 8 % bestimmt worden. Dabei zeigte sich eine Abhängigkeit der nutzbaren Porosität vom Ungleichförmigkeitsgrad und von der wirksamen Korngröße (d_{10}): bei einem kleinen Ungleichförmigkeitsgrad treten bei gleicher wirksamer Korngröße höhere nutzbare Porositäten auf als bei einem großen Ungleichförmigkeitsgrad; andererseits scheinen bei gleicher Ungleichförmigkeit

die Nutzporositäten in den Feinsanden größer zu sein als in Mittel- oder Grobsanden. Die geringere Kornrundung der Feinsande gegenüber jener der Mittel- und Grobsande drückt sich hier in den höheren Nutzporositäten aus.

Für die sandigen und kiesigen Bereiche der Oberen Süßwassermolasse wird mit einer nutzbaren Porosität zwischen 20 und 40 % zu rechnen sein.

3.6 Grundwasserfließgeschwindigkeiten

In der Hydrogeologie unterscheidet man im wesentlichen zwei Geschwindigkeitsbegriffe des Fließvorgangs des Grundwassers:

- die Filtergeschwindigkeit v_f : sie ist nach DIN 4049, Blatt 1, definiert als die Grundwassermenge (M), die einen senkrecht zur Fließrichtung liegenden Querschnitt (F) in der Zeiteinheit (t) durchfließt:

$$v_f = \frac{M}{F \cdot t} = \frac{Q}{F} \quad (\text{m/s oder m/Tag});$$

solange laminares Strömen vorliegt, gilt die von DARCY aufgestellte Beziehung:

$$v_f = k_f \cdot J \quad (\text{m/s})$$

mit: v_f = Filtergeschwindigkeit (in m/s),
 k_f = Durchlässigkeitsbeiwert (in m/s),
 J = hydraulisches Gefälle (dimensionslos);

- die Abstandsgeschwindigkeit v_a : sie ist definiert (nach DIN 4049, Blatt 1) als die Geschwindigkeit, mit der sich ein Grundwasserteilchen zwischen zwei in Grundwasserbewegungsrichtung gelegenen Beobachtungspunkten im Abstand s bewegt:

$$v_a = \frac{s}{t} \quad (\text{m/s oder m/Tag}).$$

Andererseits kann sie in guter Näherung mit dem Quotienten aus der Filtergeschwindigkeit (v_f) und dem durchflußwirksamen Hohlraumanteil (n_e) gleichgesetzt werden (nach DIN 4049, Teil 22 - Gelbdruck) und ergibt sich dann zu

$$v_a = \frac{v_f}{n_e} \quad (\text{m/s oder m/Tag}).$$

3.6.1 Filtergeschwindigkeiten

Für die Stadtgebiete München und Augsburg, wo die gesamte Grundwasserentnahme Q aus dem Jungtertiär hinreichend bekannt ist, lassen sich unter einschränkenden Annahmen Grenzwerte der Filtergeschwindigkeit errechnen.

Eine Voraussetzung, die zur Berechnung der Filtergeschwindigkeit aus der Durchflußmenge und dem Durchflußquerschnitt erfüllt sein muß, ist ein Gleichgewicht zwischen dem Grundwasserzufluß und der Grundwasserentnahme. Bei der Diskussion der Transmissivitäten konnte bereits qualitativ nachgewiesen werden, daß der natürliche Zufluß aus dem Jungtertiär bei weitem nicht die tatsächliche Grundwasserentnahme in München bzw. in Augsburg deckt (s.S. 47). Da durch die Grundwasserentnahme stärkere Zuflüsse zum Tertiär aus quartären Grundwasserleitern aktiviert werden müssen (s.S. 60 , S. 67, S. 74), muß man von einer Filtergeschwindigkeit mit und von einer solchen ohne den aktivierten Zuflüssen ausgehen. Die im folgenden berechneten Werte der Filtergeschwindigkeit können daher nur obere Grenzwerte für einen Grundwasserleiter sein, der Fremdzuflüsse erhält; die mittleren Filtergeschwindigkeiten für das jungtertiäre Grundwasser ohne nennenswerte Grundwasserentnahme müssen dagegen weit niedriger sein.

Es wird angenommen, daß die gesamte Grundwasserfördermenge aus

den jeweiligen Stadtgebieten aus einem einzigen Brunnen entnommen wird, d.h. das gesamte dem jeweiligen Stadtgebiet zuströmende Grundwasser wird theoretisch aus diesem Brunnen gefördert. Diese Annahme würde eine Störung des natürlichen Grundwasserströmungsfeldes bedingen, so daß der fiktive Brunnendurchmesser nicht mehr der ganzen, sondern nur noch der halben Zuflußbreite im ungestörten Strömungsfeld entspricht.

Für den Fall, daß die Grundwasserentnahme aus der OSM im Gleichgewicht mit dem Grundwasserzufluß im jungtertiären Grundwasserleiter stände (s.o.), können mit diesen Annahmen Filtergeschwindigkeiten errechnet werden. Wird der fiktive Brunnendurchmesser B als Abstand der beiden äußersten Brunnen quer zur Fließrichtung angesetzt und ist die mittlere Grundwassermächtigkeit H bekannt, so ergibt sich:

$$v_f = \frac{Q}{2 \cdot B \cdot H} \quad (\text{m/s}).$$

Die derzeitige Grundwasserentnahme Q aus dem Jungtertiär beträgt in München etwa $2,7 \text{ m}^3/\text{s}$ und in Augsburg rd. $1,3 \text{ m}^3/\text{s}$; abgesehen von einem einzigen Brunnen, der in München aus sehr großer Tiefe (275 - 283 m u. Gel.) Grundwasser entnimmt, kann hier als mittlere Entnahmehöhe $H = 200 \text{ m}$ gesetzt werden. Bei dem fiktiven Brunnendurchmesser von $B = 18 \text{ km}$ in München errechnet sich die mittlere Filtergeschwindigkeit zu

$$v_{f \text{ München}} = 0,032 \text{ m/d bzw. } 11,8 \text{ m/a.}$$

Für Augsburg errechnet sich bei einer etwas geringeren Aquifermächtigkeit von $H = 160 \text{ m}$ und einem fiktiven Brunnendurchmesser von rd. 10 km eine mittlere Filtergeschwindigkeit von

$$v_{f \text{ Augsburg}} = 0,035 \text{ m/d bzw. } 12,8 \text{ m/a.}$$

Diese Werte der Filtergeschwindigkeit kommen den von GEBHARDT (1968) angegebenen v_f -Werten aus dem jungtertiären Aquifer für den Raum München nahe, die nach der Tracer-Verdünnungsmethode bestimmt wurden und die zwischen 0,01 m/d (3,6 m/a) und 0,70 m/d (255 m/a) bzw. bei einem Mittelwert von 0,14 m/d (51 m/a) liegen.

Will man aber die Filtergeschwindigkeiten für den Fall einer fehlenden Grundwasserförderung berechnen, also für die ungestörte Fließbewegung des jungtertiären Grundwassers, so kann dies über die DARCY-Beziehung geschehen:

$$v_f = k_f \cdot J \text{ (m/d)}.$$

Für das Grundwasserspiegelgefälle gibt ULBRICH (1973) Werte zwischen 2 und 4 ‰ für das Gebiet um München und Augsburg an, GEBHARDT (1968) nennt für das Stadtgebiet von München Werte zwischen 1,5 und 5 ‰, die in Extremfällen 8 ‰ erreichen. Ähnlich hohe Werte (6 - 8 ‰) ermittelte SALAMEH (1974) in den Flinzsanden zwischen Isar und Paar, während er für die grobklastischeren Hauptschotteräquivalente ein Druckgefälle von 2,2 ‰ angibt. In diese Größenordnung fügen sich auch die von mir ermittelten Gefällswerte (s.S. 27) von 2 - 5 ‰ für das tiefere, jungtertiäre Grundwasser aus Schichten zwischen ca. 50 und 160 m u. Gel. Diese Gefällswerte sind demnach sicher für den jungtertiären Grundwasserleiter repräsentativ.

Die Durchlässigkeitsbeiwerte wurden aus Pumpversuchen mit rd. $1 \cdot 10^{-5}$ m/s ermittelt, ihr Schwankungsbereich reicht von $2 \cdot 10^{-6}$ m/s bis zu maximal $6 \cdot 10^{-4}$ m/s in kiesig-sandigen Bereichen.

Unter diesen Gegebenheiten errechnet sich eine mittlere Filtergeschwindigkeit v_f für die ungestörte Fließbewegung des jungtertiären Grundwassers nach dem DARCYschen Gesetz von

$$v_f = 0,003 \text{ m/d bzw. } 1,1 \text{ m/a}$$

für $k_f = 1 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ und $J = 3 \text{ ‰}$.

Aus dem Vergleich dieser Werte der Filtergeschwindigkeit in Bereichen eines wenig beanspruchten jungtertiären Grundwasserleiters (1,1 m/a) mit jenen aus den Räumen München und Augsburg ($> 10 \text{ m/a}$) mit ihrer kräftigen Grundwasserentnahme wird ersichtlich, welche hydraulischen Veränderungen die Grundwasserförderung aus dem Tertiär bereits bewirkt hat. Es erscheint mir aber gegenwärtig noch verfrüht, quantitative Aussagen hierüber zu machen.

3.6.2 Abstandsgeschwindigkeit

Die Ermittlung der Abstandsgeschwindigkeit (v_a) setzt die Kenntnis des nutzbaren Porenvolumens (n_e) und der Filtergeschwindigkeit (v_f) für die Beziehung

$$v_a = \frac{v_f}{n_e} \quad (\text{m/d})$$

voraus.

In Kap. 3.5 wurde als Nutzporosität der wasserwegsam sandigen und kiesigen Bereiche der OSM 20 bis 40 % bzw. 0,2 bis 0,4 als Porositätswert angegeben. Legt man diese Werte zugrunde, so errechnet man für die mittlere Filtergeschwindigkeit von $v_f = 0,003 \text{ m/d}$ (1,1 m/a), die nach dem DARCYschen Gesetz für die ungestörte Fließbewegung des jungtertiären Grundwassers ermittelt wurde, entsprechende Abstandsgeschwindigkeiten zwischen

$$v_a = 0,008 \text{ m/d (2,75 m/a) für } n_e = 0,4 \text{ und}$$

$$v_a = 0,015 \text{ m/d (5,5 m/a) für } n_e = 0,2.$$

Für die mittleren Filtergeschwindigkeiten, die mit 0,032 m/d für Mün-

chen und 0,035 m/d für Augsburg bestimmt wurden, ergeben sich folgende Abstandsgeschwindigkeiten:

$$v_a \text{ München} = 0,08 \text{ m/d (29,3 m/a) bis } 0,16 \text{ m/d (58,5 m/a)}$$

$$v_a \text{ Augsburg} = 0,09 \text{ m/d (32 m/a) bis } 0,17 \text{ m/d (64 m/a)}.$$

Nach dem oben Gesagten sind auch diese Werte der Abstandsgeschwindigkeit lediglich obere Grenzwerte.

4. Hydrochemische Untersuchungen

Das zur Grundwasserneubildung gelangende Niederschlagswasser nimmt seine gelösten Bestandteile in der Bodenzone, in der darunter folgenden wasserungesättigten Zone und teilweise auch noch in der wassergesättigten Zone, d. h. im Grundwasserleiter auf.

Durch die Wechselwirkung des Wassers mit dem Gestein des Grundwasserleiters nimmt das Grundwasser nach dem jeweiligen Substrat ganz charakteristische Inhaltsstoffe auf. GERB (1958) erstellte aus dieser charakteristischen Zuordnung von Grundwasser und seinem Leitergestein eine Typisierung der Grundwässer, nach der er den Typ des "Tertiärwassers" durch folgende chemische Inhaltsstoffe darstellt: (Tab. 3).

Nachdem über den Chemismus der Tertiärwässer bereits sehr vieles bekannt ist, seien meine Ausführungen auf das Wesentlichste beschränkt. Ich werde mich nur noch kurz mit den chemischen Merkmalen der Grundwässer aus meinem Arbeitsgebiet beschäftigen, die von den von GERB (1958) beschriebenen abweichen.

Die bei den Untersuchungen verwendeten Daten stammen weitgehend aus den Analysen der Staatlichen Chemischen Untersuchungsanstalt München, des Bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft, der Staatlichen Chemischen Untersuchungsanstalt Augsburg sowie aus eigenen Analysen.

Tab. 3: Chemische Charakterisierung von Grundwässern der Oberen Süßwassermolasse (= "Tertiärwässer") nach GERB (1958)

Abdampfrückstand	$200 \pm$ etwa 50 mg/l und darunter
Karbonathärte	$9 \pm$ etwa 2° dH
Gesamthärte	= Karbonathärte + etwa 1° dH
	Magnesiumanteil der Gesamthärte zwischen 25 und 50 %, überwiegend jedoch über 35 und häufig über 40 %.
	Freie Kohlensäure höher als die nach Bodländer-Tillmans zugehörige; kalkaggressive, nicht zur Schuttschichtbildung befähigte Wässer.
	Chlorid-, Sulfat- und Nitration immer nur in untergeordneten Konzentrationen vorhanden.
Kieselsäuregehalt	8 - 15 mg SiO_2 /l.

4.1 Allgemeine Übersicht

Der Abdampfrückstand gibt eine mengenmäßige Aussage über die Summe der gelösten Bestandteile im Grundwasser. Die vorliegenden Analysenergebnisse liegen mit ca. 250 ± 50 mg/l geringfügig über den von GERB (1958) angegebenen Mittelwerten.

Die elektrolytische Leitfähigkeit ist ein Maß für den Gehalt an gelösten Salzen. Die gemessenen Werte liegen zwischen $350 \mu\text{S}/\text{cm}$ und $510 \mu\text{S}/\text{cm}$ (bezogen auf 20°C). Bei Wiederholungsmessungen sowie bei Vergleichen mit bereits früher gemessenen Leitfähigkeiten wurden nur unbedeutende Abweichungen festgestellt.

In der Regel sind die jungtertiären Grundwässer sauerstofffrei, es sind also reduzierende Wässer. Daher kann es zum Auftreten von

Eisenionen mit Konzentrationen bis zu 1,3 mg/l kommen. Dagegen sind sie wegen ihrer reduzierenden Eigenschaften nitratfrei. Ihr Chlorid- und Sulfatgehalt ist äußerst gering.

Die Gesamthärte nimmt mit der Entnahmetiefe der Grundwasserproben ab. Der Magnesiumanteil der Härte liegt über 35 %, meistens zwischen 40 und 55 %. Im weiteren werden vor allem Grundwasserproben aus den tieferen Bereichen häufig durch einen erhöhten Bikarbonatgehalt charakterisiert, der oft den Gehalt an Erdalkali weit übersteigt und mit dem verstärkten Vorkommen von Alkaliionen (Na^+ -Ionen) in Verbindung zu bringen ist.

Unter den Kationen herrschen die Erdalkaliionen Calcium und Magnesium sowie das Alkaliion Natrium (untergeordnet auch Kalium), bei den Anionen das Hydrogenkarbonat ion vor; untergeordnet sind bei den Anionen auch Chlorid- und Sulfationen vertreten; Nitrat- und Nitritionen fehlen fast immer (Abb. 20).

Der durch die Säurekapazität ($K_{S\ 4,3}$) bestimmte Hydrogenkarbonatgehalt liegt zwischen 3,2 und 6,6 mmol/l. Da die gemessene freie Kohlensäure fast immer der jeweiligen zugehörigen freien Kohlensäure entspricht, befinden sich die Grundwässer aus der OSM in meinem Arbeitsgebiet weitgehend im Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht.

Typenmäßig gliedern sich die Grundwässer aus der OSM in

- einen Ca - Mg - HCO_3 -Typ und
- einen Na - HCO_3 -Typ.

Der erste Typ tritt bevorzugt in den obersten jungtertiären Grundwasserbereichen auf, der zweite in den tieferen Bereichen ab etwa 50 bis 60 m Tiefe.

Die Extrem- und die Mittelwerte der vorliegenden chemischen Analysen sind in der Tab. 4 aufgeführt; zum Vergleich wurden charakte-

ristische Größen der "Tertiärwässer" nach GERB (1958) mit aufgeführt.

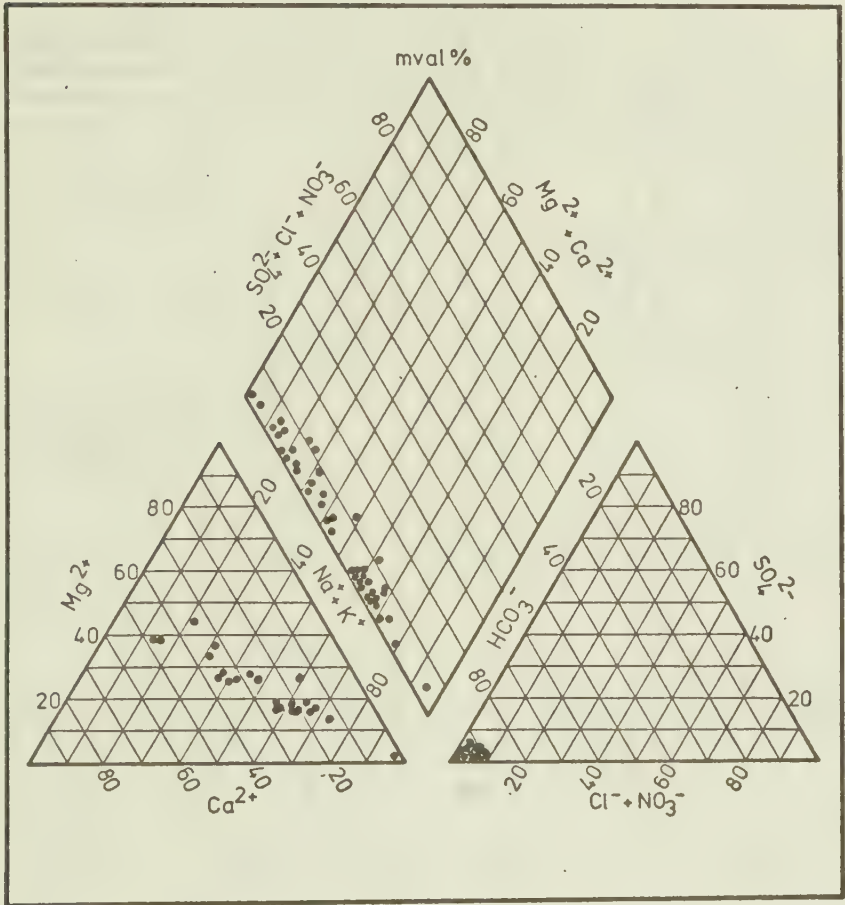


Abb. 20: Analysendarstellung von Grundwasserproben aus dem jung-tertiären Grundwasserleiter im Raum München und Augsburg.

Die chemischen Lösungsinhalte der Wässer aus dem Jungtertiär unterliegen keinen nennenswerten zeitlichen Schwankungen, wie Tab. 5

Tab. 4: Der Grundwasserchemismus der jungtertiären Grundwässer im Raum München und Augsburg

	Extremwerte Max. - Min.	Mittelwert	Vergleichs- wert n. GERB
pH-Wert	9.11 - 7.20		
Abdampfdruck- stand mg/l	337 - 201	280 (51)	200 + 50
Ca ²⁺ mg/l	84 - 5	34 (57)	
Mg ²⁺ mg/l	36 - 1.8	18 (55)	
Na ⁺ mg/l	121.4 - 5	53.7 (24)	
K ⁺ mg/l	1.5 - 0.6	1.0 (22)	
SO ₄ ²⁻ mg/l	40.8 - Spur	7 (83)	Spuren
Cl ⁻ mg/l	10 - nn	3.5 (85)	ger. Mengen
NO ₃ ⁻ mg/l	30 - nn	nn (85)	ger. Mengen
NO ₂ ⁻ mg/l	1.5 - nn	nn (64)	
HCO ₃ ⁻ mval/l	6.40 - 3.20	4.90 (86)	
NH ₄ ⁺ mg/l	1.5 - nn	nn (56)	
Fe ²⁺ mg/l	1.3 - nn	0.16 (82)	
Mn ²⁺ mg/l	0.21 - nn	0.02 (60)	
CO ₂ geb. mg/l	144.4 - 70.4	104.8 (76)	
CO ₂ frei mg/l	40.0 - 1.8	12.3 (58)	
SiO ₂ mg/l	24.0 - 6.3	14.6 (51)	8 - 15
fr. O ₂ mg/l	4.6 - nn	nn (42)	nn
el. Leitfähig- keit µS/cm	550 - 325	435 (28)	
Gesamthärte °dH	17.9 - 0.4	8.7 (76)	KH + 1
Karbonathärte	17.9 - 9.0	13.6 (83)	9 + 2

Tab. 5: Schwankungsbereich im Chemismus des Grundwassers aus der OSM, dargestellt am Brunnen J 47 München (Entnahmetiefe der Grundwasserprobe zwischen 219 m und 232 m u. Gel.)
(nach Analysen des M.v.-Pettenkofer-Instituts).

Analysendatum	15. 3. 67	17. 4. 72	25. 4. 73	2. 7. 74	6. 5. 75
Temperatur	-	16.6	16.8	16.4	17.0 °C
pH-Wert	8.5	8.75	8.6	8.61	8.6
el. Leitfähigkeit	330	376	376	370	364 µS/cm
Ca ²⁺	2.4	2.63	2.41	2.18	2.96 mg/l
Mg ²⁺	-	0.98	1.17	1.27	1.10 mg/l
Na ⁺	131.0	120.75	133.0	131.0	121.4 mg/l
K ⁺	1.3	1.17	2.15	1.37	0.62 mg/l
Fe ²⁺	0	0	0	0	0
Mn ²⁺	0	0	0	0	0
NH ₄ ⁺	0	0	0	0	0
Cl ⁻	2.1	1.8	3.3	5.0	4.0 mg/l
SO ₄ ²⁻	6.2	8.4	9.9	8.1	0.0 mg/l
NO ₃ ⁻	0	0	0	0	0
NO ₂ ⁻	0	0	0	0	0
HCO ₃ ⁻	183.0	256.2	250.1	268.4	250.1 mg/l
SiO ₂	11.3	14.4	14.5	12.0	14.6 mg/l
m-Wert	4.7	4.8	4.7	4.8	4.7 mval/l
Gesamthärte	0.8	0.59	0.58	0.58	0.58 °dH
Karbonathärte	13.2	13.4	13.2	13.4	13.2 °dH

zeigt. Das analysierte Grundwasser stammt aus dem 232,5 m tiefen Brunnen J 47 in München, der bis 218,65 m unter Flur durch Sperrohre und Tonabdichtung zwischen Gebirge und Sperrohr gegen das höherliegende Grundwasser abgedichtet ist. Die Filterrohre liegen zwischen 219 m und

232 m u. Gel. und erschließen im wesentlichen Mittel- bis Grobsande mit zwischengeschalteten Feinsand- und Fein-Mittelkieslagen. Die durchschnittliche Förderrate des Brunnens beträgt 10 - 15 l/s, die Gesamtförderung pro Jahr betrug:

1974	314 470 m ³ /Jahr
1975	240 650 m ³ /Jahr
1976	255 260 m ³ /Jahr.

4.2 Calcium, Natrium und Grundwasserhärte

Die Grundwässer der OSM können in Ca(Mg)-Hydrogenkarbonatwässer und in Na-Hydrogenkarbonatwässer unterteilt werden. Der Calciumgehalt wird vom Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht bestimmt. In den vorliegenden Grundwasseranalysen liegen die Calciumgehalte zwischen 84 mg/l und weniger als 5 mg/l, sie nehmen mit der Entnahmetiefe ab. Grundwasserproben aus den obersten jungtertiären Sand- und Kiesschichten haben Ca²⁺-Gehalte zwischen 80 mg/l und 30 mg/l und zeigen Ähnlichkeiten mit den von GERB (1958) beschriebenen Kalkschotterwässern aus quartären Grundwasserleitern.

Für den hydrologisch gut erschlossenen Münchener Raum läßt sich diese Tiefenabhängigkeit des Ca²⁺-Gehaltes anschaulich darstellen. So zeigt Abb. 21, daß bis zu einer Tiefe der Filterrohre von etwa 50 - 60 m u. Fl. hohe Ca²⁺-Gehalte auftreten, die ähnlich den Calciumgehalten in den quartären Kalkschotterwässern sind. Darunter nehmen die Ca²⁺-Gehalte stark ab.

Daraus läßt sich für den oberen Bereich bis etwa 60 m Tiefe ableiten, daß die Grundwasserneubildung in starkem Maße durch Zusicke- rung aus quartären Grundwasserleitern erfolgen muß. Es stellt sich natürlich die Frage, ob dieser Grundwasserumsatz nur durch die starke Grundwasserentnahme in Mün chen "erzwungen" wird

oder ob auch in weniger beanspruchten Gebieten eine ähnliche "Schichtung" zu beobachten ist. Mit hydrochemischen Untersuchungen läßt sich diese Frage wegen der unzureichenden hydrologischen Aufschlußverhältnisse im restlichen Gebiet nicht zufriedenstellend lösen. Hierzu erbringen jedoch weiter unten die Isotopenuntersuchungen einen wichtigen Beitrag (s.S. 65, S. 74).

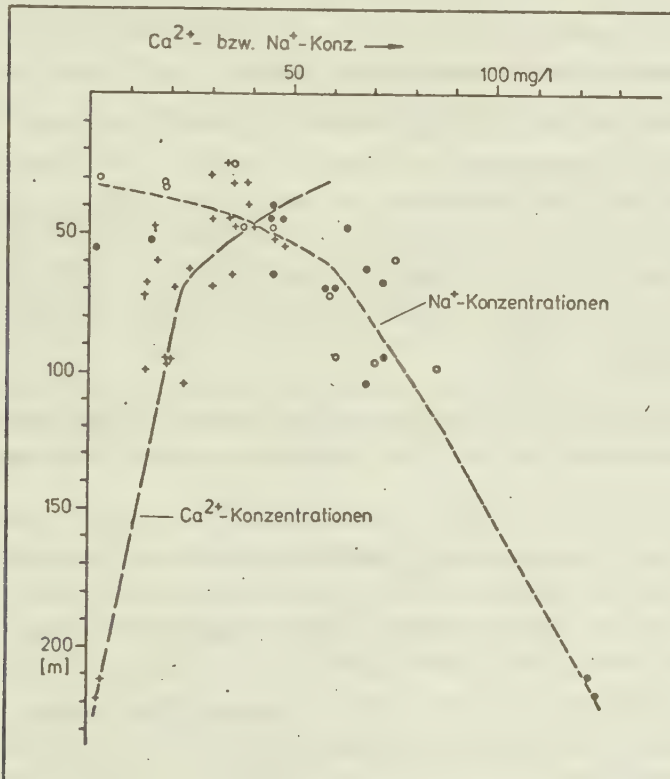
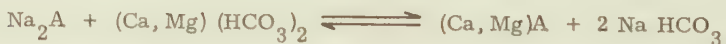


Abb. 21: Abhängigkeit des Ca²⁺- bzw. Na⁺-Gehalts in jungtertiären Grundwasserproben aus Münchener Brunnen von der Entnahmetiefe. + = Calciumgehalte, o = Natriumgehalte (analysiert), ● = Natriumgehalte (berechnet). Mit den Linien abnehmenden Ca²⁺- bzw. zunehmenden Na⁺-Trends.

Mit abnehmendem Calciumgehalt nimmt der Gehalt an Natrium mit der Tiefe zu: im oberen, calciumreicheren Teilbereich bis zu einer Tiefe von 50 - 60 m u. Gel. werden Na^+ -Gehalte von 2 mg/l bis 45 mg/l gemessen, darunter steigen die Natriumkonzentrationen auf 60 mg/l und darüber an. Beispielsweise wurden in zwei Brunnen, die nur aus dem Bereich des Grundwasserleiters zwischen ca. 210 m bis 240 m u. Gel. fördern, die weitaus höchsten Na^+ -Gehalte mit 122 mg/l bzw. 126 mg/l festgestellt; die Ca^{2+} -Konzentrationen liegen in diesen Grundwasserproben nur noch bei rd. 3 mg/l.

Die Umwandlung von $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ -Wässern in NaHCO_3 -Wässer geschieht durch Kationenaustausch innerhalb der OSM. Nach SCHWILLE (1954) treten in Lockersedimenten oft Tonminerale, Glimmer und glimmerartige Mineralien, Glaukonit und Feldspäte als "natürliche Permutite" mit kationenumtauschenden Eigenschaften auf. Bis auf Glaukonit finden sich alle diese Mineralien in reichlichem Maße in den Sedimenten der OSM.

Der Kationenaustausch zwischen dem Grundwasser und dem Gestein des Grundwasserleiters läuft nach folgender genereller Reaktionsgleichung ab:



wobei A für den Austauscher steht. Dieser Ionenaustausch erfolgt langsam und macht hohe Verweilzeiten des Grundwassers im Untergrund erforderlich. Solch hohe Verweilzeiten des Grundwassers konnten dann auch durch die Isotopenuntersuchungen nachgewiesen werden (s. S. 73).

Durch den Kationenaustausch findet also mit fortschreitender Tiefe eine Enthärtung des Grundwassers statt. Die freie zugehörige Kohlensäure, die zur Aufrechterhaltung des Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichts benötigt wurde, bleibt entweder als aggressive Kohlensäure

im Grundwasser tieferliegender Bereiche zurück oder sie bringt weiteres Calcium oder Natrium als Hydrogenkarbonat in Lösung.

Die durch den Ionenaustausch bewirkte Härteschichtung im Grundwasser der OSM zeigt sich in Gesamthärten, die im oberen Grundwasserbereich über 10°dH (bis zu $17,9^{\circ}\text{dH}$) liegen; zur Tiefe nimmt die Gesamthärte auf weniger als 1°dH im Grundwasser aus den Kies- und Sandschichten unterhalb 200 m u. Fl. ab.

Mit der Umwandlung in NaHCO_3 -Wasser sinkt auch der pH-Wert von pH 7 - pH 7,5 auf pH 8 - pH 8,7 mit Extremwerten bis zu pH 9,1.

5. Isotopenuntersuchungen

Die Untersuchung der Umweltisotope Kohlenstoff-14, Tritium, Deuterium und Sauerstoff-18 liefert wertvolle Hinweise über das Grundwasseralter und die Herkunft des Grundwassers sowie seine Verweilzeit im Grundwasserleiter. In günstigen Fällen kann auch auf die Fließrichtung und die Fließgeschwindigkeit des Grundwassers geschlossen werden.

Die stabilen Isotope des Wasserstoffs und des Sauerstoffs, Deuterium und ^{18}O , geben u. a. auch Hinweise auf die klimatischen Verhältnisse zur Zeit der Grundwasserneubildung; sie können somit eine Ergänzung zu den ^{14}C -Altersdatierungen liefern.

5.1 Tritiumuntersuchungen

5.1.1 Allgemeines zur Methode

Das radioaktive Wasserstoffisotop ^3H oder Tritium wird durch kosmische Strahlung in der höheren Atmosphäre erzeugt. Zu Wasser oxidiert gelangt es mit den Niederschlägen ins Grundwasser. Die natürliche Produktionsrate beträgt ca. 6 TU^+ (ROETHER 1967).

+) TU = tritium unit oder Tritiumeinheit; 1 TU entspricht der Konzentration von einem Tritiumatom auf 10^{18} Wasserstoffatome.

Durch die Kernwaffentests seit 1952, vor allem aber im Jahr 1963 gelangte zusätzliches Tritium in die Atmosphäre und in die Troposphäre, so daß seit dieser Zeit auch wesentlich höhere Tritiumgehalte mit den Niederschlägen ins Grundwasser gelangen.

Sobald ein dermaßen "Tritium-markiertes Wasser" in den Boden gelangt ist, nimmt sein Gehalt durch radioaktiven Zerfall mit einer Halbwertszeit von 12,3 Jahren ab. Vor 1953 ins Grundwasser gelangte Niederschläge können daher im Rahmen der Meßgenauigkeit (kleiner als 1,5 TU) nicht mehr datiert werden.

5.1.2 Tritiumprobennahme

Die Auswahl der Brunnen, aus denen Tritium- (und Deuterium- und Sauerstoff-18-) -proben entnommen wurden, erfolgte unter zweierlei Gesichtspunkten. Erstens sollte aus den Ballungsgebieten mit den stärkeren Grundwasserentnahmen aus dem Jungtertiär ein möglichst dichtes Beobachtungsnetz gewonnen werden; aus dem relativ unbeanspruchten restlichen Gebiet wurden ebenfalls Proben entnommen, um einen Zustandsvergleich zu erhalten. Zweitens sollten Wasserproben aus verschiedenen Tiefenlagen der Filterstrecken entnommen werden, um eine Tiefenabhängigkeit des Tritiumgehalts und damit einen Hinweis auf eine mögliche isotopische Schichtung im Grundwasserleiter zu gewinnen. Die beprobten Brunnen sind in die Grundlagenkarte (Beil. 1) eingetragen.

Die Proben selbst wurden, soweit dies möglich war, im Brunnen-schacht direkt aus der Steigleitung entnommen.

5.1.3 Der Tritiumgehalt der Grundwasserproben

Von den 70 gemessenen Grundwasserproben (30 aus dem Bereich München, 25 aus Augsburg und dem Lechtal sowie 15 aus dem restlichen Gebiet) enthielten 24 Proben Tritiumkonzentrationen zwischen 2,6 TU

und 188 TU (s. Tab. 8). Grundwasser aus Brunnen mit Filterstrecken oberhalb ca. 60 m u. Gel. weist im allgemeinen höhere Tritiumgehalte auf als Grundwasser aus Brunnen mit Filterstrecken unterhalb 60 m u. Gel.; diese Grundwasserproben sind im allgemeinen tritiumarm bis tritiumfrei (Abb. 22 a - c). Demnach wurde das Grundwasser im oberen Bereich zwischen Tertiäroberfläche und etwa 45 - 75 m u. Gel. teilweise oder ganz innerhalb der letzten 30 Jahre gebildet, während unter 45 - 75 m u. Gel. älteres Grundwasser vorliegt. Der Übergang vom oberen zum unteren Bereich ist unscharf; er äußert sich in einer Durchmischungszone mit hohen Tritiumwerten neben

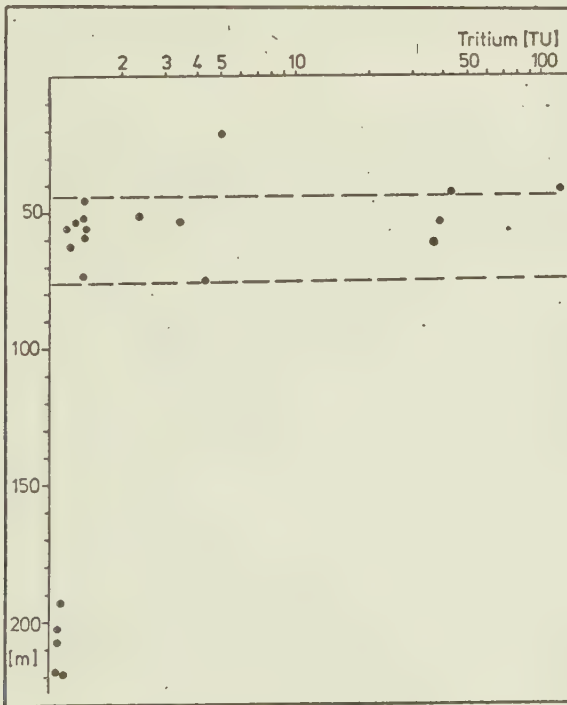
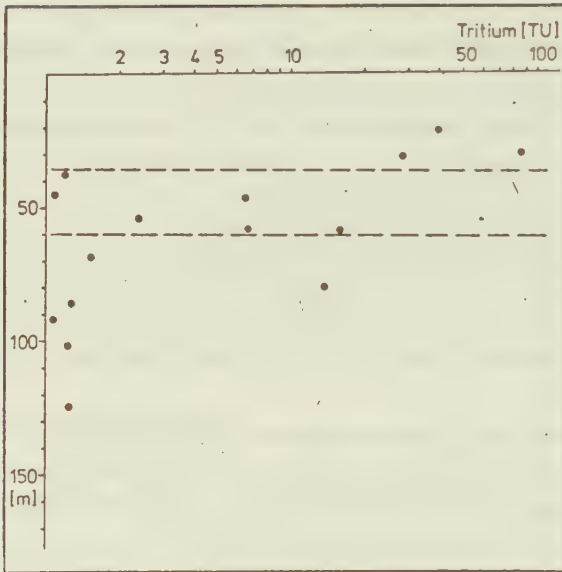


Abb. 22 a: Abhängigkeit des Tritiumgehalts von der Entnahmetiefe in Grundwasserproben aus Tertiärbrunnen in München

b)



tritiumarmem bis tritiumfreiem Grundwasser. Diese Durchmischungszone kann verschieden hoch liegen; in ihrer Tiefenlage und in ihrer Dicke zeigt sie eine Beziehung zu der Grundwasserentnahme:

- im wenig beanspruchten Gebiet zwischen Würm und Lechtal liegt sie zwischen ca. 30 - 45 m u. Gel. (Abb. 22 c);
- im Augsburger Gebiet (Abb. 22 b), wo z. Zt. $1,3 \text{ m}^3/\text{s}$ Grundwasser aus dem Jungtertiär gefördert werden, liegt sie zwischen 40 - 60 m u. Gel.;
- im Stadtgebiet München (Abb. 22 a) schließlich werden gegenwärtig etwa $2,7 \text{ m}^3/\text{s}$ aus der OSM gefördert, also rund doppelt so viel wie in Augsburg; hier liegt die Durchmischungszone zwischen 45 - 75 m u. Gel.

Trägt man diese Ergebnisse in einem schematischen Ost-West-Profil auf, so wird deutlich, daß die Durchmischungszone im Bereich der Großstädte München und Augsburg mit ihrer hohen Grundwasserentnahme dicker ist und höher liegt (Abb. 23) als im Zwischengebiet. Die Untergrenze dieser Durchmischungszone in der Abb. 23 basiert auf den gemessenen Tritiumwerten und braucht nicht mit der tatsächlichen Untergrenze des Durchmischungsbereiches identisch zu sein, da mit Tritium nur ein Zeitraum von ca. 30 Jahren erfaßt werden kann. Für eine eindeutigere Beschreibung dieser Untergrenze wird von der Ausdehnung des ^{14}C -Meßprogramms ein besserer Einblick erwartet (s. auch S. 74).

In den obersten 60 m der OSM wird demnach ständig junges, d. h. nach 1953 gebildetes Niederschlagswasser im Wege der Grundwasserneubildung nachgeführt. Bei der Betrachtung des Grundwasserhaushalts wird also zwischen einem oberflächennahen Bereich des jungtertiären Grundwasserleiters mit raschem Grundwasserumsatz und einem tieferliegenden Bereich mit langsamem Grundwasserumsatz zu unterscheiden sein.

Mit der hier angeführten Probenserie kann allerdings noch keine Aussage darüber gemacht werden, ob sich die Durchmischungszone hinsichtlich ihrer Dicke und ihrer Tiefenlage gegenwärtig in einem stabilen Zustand befindet oder ob sie wegen der laufenden Grundwasserentnahme aus dem Jungtertiär weiter absinkt.

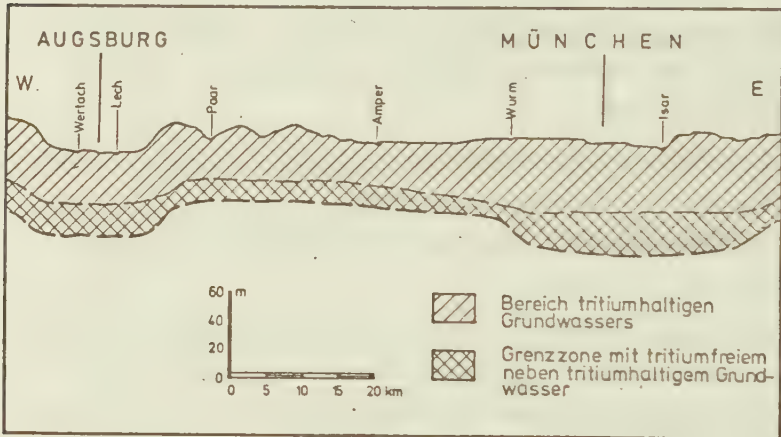


Abb. 23: Schematischer Verlauf der Durchmischungszone mit tritiumfreiem neben tritiumhaltigem Grundwasser in einem E-W-Profil durch München und Augsburg

Diese Frage ist aber für eine Bilanzierung des Grundwassers in der OSM von entscheidender Bedeutung und ihr sollte in Zukunft eine besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden. Verändert sich die Durchmischungszone in ihrer Lage nicht, so bedeutet das, daß durch die Entnahme von Grundwasser lediglich der Umsatzraum für die Grundwassererneubildung vergrößert wurde und die Grundwasserförderung jetzt im Gleichgewicht mit den Grundwasserzuflüssen steht; das geförderte Grundwasser besteht aus dem tritiumarmen bis tritiumfreien Grundwasser aus dem Jungtertiär und dem tritiumreichen Grundwasser, das ständig über quartäre Grundwasserleiter

nachgeführt wird. Ein weiteres Herabsinken dieses Durchmischungs-
bereichs wäre ein Indiz dafür, daß durch die Grundwasserförderung
in zunehmendem Maße tritiumfreies Grundwasser aus der natürli-
chen Rücklage entnommen wird, d. h. daß noch kein Gleichgewichts-
zustand zwischen Grundwasserförderung und Grundwasserzuflüssen
besteht.

Daß die Durchmischungszone in Bewegung ist, kann bisher leider
nur anhand eines Beispiels gezeigt werden: aus einem Industrie-
brunnen in Gersthofen, 8 km nördlich von Augsburg, liegt eine Tri-
tiummessung aus dem Jahr 1970 vor, wo innerhalb der Nachweis-
grenze von 4 TU kein Tritium festgestellt werden konnte; in der
von mir 1976 entnommenen Grundwasserprobe aus demselben Brun-
nen befand sich Tritium in einer Konzentration von 6,6 TU.

Der Brunnen selbst liegt im Absenkbereich von Augsburg (s. auch
Beil. 2). Er ist 131,5 m tief und bis 55 m u. Gel. durch ein Sperr-
rohr und Zementierung gegen das quartäre Grundwasserstockwerk
abgedichtet. Die Filter liegen im Bereich zweier Sandschichten
zwischen 55 m - 73 m und 99,5 m - 126,1 m u. Gel. Als Deck-
schicht des jungtertiären Aquifers sind zwischen 23,8 m und 55 m
u. Fl. insgesamt 15,4 m Tone und 15,8 m tonige Sande eingelagert
(nach dem Bohrmeisterprofil).

Die derzeitige Förderrate des Brunnens beträgt ca. 20 l/s. Die
Tatsache, daß dieser Brunnen, dessen oberste Filterstrecke ge-
rade noch in der Durchmischungszone liegt, früher kein Tritium
führte und heute tritiumhaltiges Grundwasser fördert, spricht da-
für, daß durch die Grundwasserentnahme im Raum Augsburg der
Grenzbereich seit 1970 nach unten gewandert ist.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß aus der OSM im
Raum München und Augsburg mehr Grundwasser gefördert wird
als diesen Räumen ohne Grundwasserförderung zufließen würde.
Da sich die ursprüngliche Grundwasserneubildung durch Zuflüsse
aus dem Quartär erhöhen kann, braucht trotz dieser Tatsache noch

kein Raubbau an dem jungtertiären Grundwasser befürchtet zu werden. Bis zu welchem Grade jedoch eine solche Erhöhung der Grundwasserneubildung möglich ist, kann zur Zeit noch nicht abgeschätzt werden. Für die Grundwasserneubildung in tieferen Schichten der OSM muß demnach nicht irgend ein Einzugsgebiet weiter südlich gefordert werden; die Grundwasserneubildung kann auch unmittelbar vertikal durch die Ton- und Mergelschichten hindurch aus quartären Grundwasserleitern im Hangenden der OSM erfolgen.

5.2 ^{14}C -Altersbestimmungen

5.2.1 Allgemeines zur Methode

Die Grundlagen der Altersdatierung mit Radiokohlenstoff wurden von LIBBY (1947) entwickelt. Diese Methode basiert auf der Tatsache, daß nach der Umwandlung des in der Atmosphäre durch kosmische Strahlung gebildeten ^{14}C in CO_2 alle lebende Substanz über die Nahrungsaufnahme bzw. die Assimilation markiert wird.

Die Modellvorstellung, die MÜNNICH (1957, 1968) aus geochemischen Überlegungen entwickelte, führten zu einer Ausdehnung der ^{14}C -Altersdatierung auch auf das Grundwasser. Niederschlagswasser nimmt bei der Versickerung in der belebten Bodenzone biogenes CO_2 mit einem ^{14}C -Gehalt von 100 % modern auf, das den im Gestein befindlichen Kalk (^{14}C -frei) als Bikarbonat lösen kann.

Da das Wasser im Untergrund fossilen, d.h. ^{14}C -freien Kalk löst, wird die ^{14}C -Anfangskonzentration des Kohlenstoffs, das im Grundwasser auftritt, kleiner sein als die im atmosphärischen CO_2 ; sie kann theoretisch Werte zwischen 50 und 100 % modern annehmen. In der Regel schwanken in Mitteleuropa die Anfangsgehalte um 85 % modern, ein Wert, den MÜNNICH (1957) ermittelte und der

inzwischen von mehreren Autoren bestätigt werden konnte (u. a. von GEYH 1970, VOGEL 1967 und 1970, MÜNNICH & VOGEL 1959).

Der Anfangsgehalt an ^{14}C kann mit Einschränkungen durch den $\delta^{13}\text{C}$ -Gehalt korrigiert werden. Was diese Korrekturmöglichkeiten angeht, so sei auf die einschlägige Literatur verwiesen (MOOK 1970, PEARSON & HANSHAW 1970, SMITH u. a. 1976).

5.2.2 Ergebnisse

Bisher liegen ^{14}C -Analysen von Grundwasserproben aus 8 Brunnen vor: davon stehen jeweils 4 Brunnen in München und 4 in Augsburg und davon sind wiederum je 2 aus Brunnen mit hoch liegenden Filterstrecken (zwischen 52 und 130 m u. Gel. in München bzw. zwischen 37 und 127 m u. Gel. in Augsburg) und je 2 aus Brunnen, deren Filterstrecken in München unterhalb 192 m u. Gel. und in Augsburg unterhalb 85 m u. Gel. liegen. Alle Proben sind im Rahmen der Meßgenauigkeit tritiumfrei, es ist also keine Zumischung von rezentem, d. h. nach 1953 gebildetem Niederschlagswasser erfolgt. Die ^{14}C -Gehalte und -Modellalter sind in Tab. 6 angeführt. Dabei bedeutet Δ_1 = die Schwankungsbreite des gemessenen ^{14}C -Gehalts (in Jahren v. h.) und Δ_2 = die Schwankungsbreite unter zusätzlicher Berücksichtigung der Unsicherheit im ^{14}C -Anfangsgehalt; bei der Berechnung wurde ein ^{14}C -Anfangsgehalt von 85 % modern mit einem Unsicherheitsbereich von + 5 % mod. bis - 15 % mod. angenommen, wie er aus der Literatur bekannt ist und anscheinend für Mitteleuropa repräsentativ ist (MÜNNICH 1968). Bei der Angabe des Tritiumgehalts bedeutet < a: der Meßwert + zweifache Standardabweichung ist kleiner als a.

Leider läßt es der Brunnenausbau der Tertiärbrunnen meistens nicht zu, aus einer genau definierten und gegen andere Schichten abge-

Tab. 6: Isotopengehalte und ^{14}C -Modellalter von jeweils vier Grundwasserproben aus der OSM in München und Augsburg

Brunnen	Filter von - bis (m u. Gel.)	Tritium TU	^{14}C -Gehalt % modern	^{14}C -Modellalter (Jahre v. h.)		$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	δ^{D} (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)
				$\Delta 1$	$\Delta 2$			
Paulaner TBr. 2	203 - 236	< 0.4	7.9 $\pm$ 0.5	19 100 + 510	+ 990 - 2050	- 11.2	- 92.2	- 12.44
Löwenbräu Br. 6	192 - 220	< 0.7	18.7 $\pm$ 0.6	12 160 + 260	+ 720 - 1810	- 4.6	- 81.3	- 11.23
Thorbräu TBr.	124 - 164	< 0.4	6.9 $\pm$ 0.6	20 170 + 700	+ 1190 - 2230	- 12.2	- 84.1	- 11.65
Bürgerbräu TBr	86 - 162	< 0.7	8.2 $\pm$ 0.5	18 790 + 490	+ 970 - 2040	- 12.4	- 82.3	- 11.17
Krauss-Maffei TBr. 3	52 - 130	< 0.6	39.5 $\pm$ 1.0	6 160 + 200	+ 670 - 1760	- 11.8	- 68.5	- 8.94
Ellwanger	55 - 75	< 1.2	47.2 $\pm$ 1.2	4 730 + 200	+ 670 - 1760	- 12.6	- 76.8	- 10.46
Elbeo	37 - 90	< 0.7	52.1 $\pm$ 1.3	3 930 + 200	+ 660 - 1760	- 13.3	- 73.0	- 9.91
Höchst-Gerst- hofen TBr. N	58 - 127	< 2.7	62.2 $\pm$ 2.0	2 510 + 260	+ 720 - 1810	-	- 71.9	- 9.97

sperreten Schicht Grundwasserproben zu entnehmen, so daß es sich bei fast allen Proben um Mischwässer handelt, die aus mehreren grundwasserführenden Schichten stammen und im Brunnen gemischt wurden.

Da das ^{14}C -Modellalter der jungtertiären Grundwässer nicht kontinuierlich mit der Tiefe abnimmt, erschwert sich dadurch die Interpretation der Meßdaten. Das ^{14}C -Modellalter der Grundwasserproben liegt nach Tab. 6 zwischen 20 200 Jahren v.h. und 2 500 Jahren v.h.. Die Proben aus Brunnen mit höherliegenden Filterstrecken weisen ^{14}C -Alter von 2 500 Jahren v.h. bis 6 200 Jahre v.h. auf, die Brunnen mit tiefliegenden Filterstrecken von 18 800 Jahren v.h. bis 20 200 Jahren v.h..

Bei dieser Betrachtung wurde die Grundwasserprobe aus dem Tiefbrunnen 6 von Löwenbräu ausgenommen, da ihr $\delta^{13}\text{C}$ -Gehalt von - 4,6 ‰ stark von den übrigen $\delta^{13}\text{C}$ -Gehalten und auch von den Modellvorstellungen abweicht. Welche Bedeutung diesem $\delta^{13}\text{C}$ -Gehalt zukommt, muß erst noch durch weitere Untersuchungen geklärt werden.

Die Trennung der ^{14}C -Alter der gemessenen Molassegrundwässer in einen Altersbereich um rund 20 000 Jahre v.h. und einen Altersbereich zwischen 2 500 und etwa 6 000 Jahren v.h. scheint die Existenz einer schon mehrfach beobachteten Alterslücke in den Grundwasseraltern zu bestätigen (MÜNNICH 1968, ANDRES & GEYH 1969 und 1972). Grundwasseralter zwischen ca. 11 000 und 20 000 Jahren v.h. fehlen immer wieder. Zu dieser Zeit war anscheinend das im Periglazial gelegene Gebiet durch Permafrost verschlossen, so daß keine Grundwasserneubildung aber auch kein Grundwasserauslauf durch den tiefgreifend gefrorenen Untergrund hindurch möglich war.

Daß dennoch keine Grundwasseralter zwischen rd. 6 000 und 10 000

Jahren v.h. gefunden wurden, kann entweder an der geringen Entnahmedichte der Grundwasserproben liegen oder aber durch Mischung verschieden alter Wässer im oberen Bereich des Aquifers bedingt sein. Aus den Ergebnissen der Tritiumuntersuchungen sowie aus den Folgerungen, die aus den Transmissivitätswerten gezogen wurden, wird deutlich, daß sich der Aquifer in zwei Grundwasserschichten mit unterschiedlichem hydraulischem Verhalten gliedert. Im oberen Bereich findet ein rascher Grundwasserumsatz mit erhöhter Grundwasserneubildung statt. Wenn nun keine Grundwasseralter zwischen 6 000 Jahren v.h. und rund 10 000 Jahren v.h. gefunden werden, könnte das bedeuten, daß im oberen Bereich diese Grundwasseralter wegen der Zumischung von jüngerem, jedoch noch tritiumfreiem Wasser gar nicht mehr nachzuweisen sind. Dies würde aber auch bedeuten, daß sich die Durchmischungszone, die in den Tritiumwerten gefunden wurde, sich auch in den ^{14}C -Altern findet und daß sie tatsächlich tiefer hinabreicht als sie mit dem relativ kurzlebigen Tritium nachgewiesen werden kann.

Bei der Betrachtung der einzelnen ^{14}C -Alter fällt weiter auf, daß in der Gruppe von Grundwasserproben, die aus größeren Tiefen stammt, für München geringere ^{14}C -Modellalter gemessen werden als für Augsburg, obwohl in München die Entnahmetiefe mit 192 m bis 236 m u. Gel. tiefer liegt als in Augsburg mit 85 m bis 164 m u. Gel. Das kann seine Ursache darin haben, daß in München generell mehr Grundwasser aus der OSM entnommen wird und daher verstärkt von oben jüngerer Grundwasser nachgezogen wird; jüngerer Grundwasser heißt in dem Fall, daß es nicht rezent sein muß, aber doch bedeutend jünger als das tiefere Grundwasser.

Dennoch wird bei fast identischer Entnahmetiefe im Löwenbräu- und im Paulaner-Tiefbrunnen ein Altersunterschied von annähernd 7 000 Jahren gemessen. Möglicherweise liegt die Erklärung dazu in der ver-

schieden starken Grundwasserentnahme in der unmittelbaren Umgebung dieser Brunnen. Während beim Paulaner-Tiefbrunnen nur noch zwei weitere Brunnen aus vergleichbaren Tiefen Grundwasser entnehmen, pumpen in der unmittelbaren Absenkzone des Löwenbräu-Tiefbrunnens weitere 10 bis 15 Brunnen Grundwasser aus sämtlichen wasserführenden Schichten der OSM ab. Die Strömungsverhältnisse sind dort sicher nachhaltiger beeinflusst, was sich auch in dem weitreichenderen Absenkbereich bemerkbar macht, wie der Abb. 12 zu entnehmen ist (der Löwenbräu-Brunnen liegt etwa in dem Bereich, in dem die 490 m-Isolinie weit nach S umbiegt, während der Paulaner-Brunnen etwas südlich der 505 m-Isohypse östlich der Isar liegt).

Die genannte Durchmischungszone greift in München anscheinend schon bis auf etwa 200 m u. Gel. hinunter. Sollte sich dies durch weitere Untersuchungsergebnisse bestätigen, so ließe sich das ^{14}C -Alter des Löwenbräu-Tiefbrunnens mit 12 160 Jahren v. h. gut erklären (wenn auch nicht der $\delta^{13}\text{C}$ -Gehalt). Es würde aber auch bedeuten, daß im Münchener Raum die Zuflüsse aus dem südlichen Gebiet der OSM nur mehr einen kleinen Teil der Grundwasserfördermenge ausmachen und der überwiegende Anteil des Grundwassers aus dem Umsatzraum mit dem Grundwasser aus quartären Schichten und aus der Rücklage des Tertiärs stammt. Nach dieser Annahme müßte sich die Durchmischungszone abwärts bewegen.

In den Augsburger Brunnen mit tieferliegenden Filterstrecken kann diese Durchmischung verschieden alten Grundwassers entweder noch nicht festgestellt werden oder sie ist wesentlich geringer als in München. Hier ist die Durchmischungszone anscheinend noch nicht unter 60 m u. Gel. herabgesunken.

5.3 Die stabilen Isotope Deuterium und Sauerstoff-18

5.3.1 Allgemeine Grundlagen

Für die vorliegenden Untersuchungen sollte mit Hilfe der stabilen Iso-

tope Deuterium und Sauerstoff-18 die Interpretation der ^{14}C -Altersbestimmungen gestützt werden; daneben sollten die Ergebnisse der Tritiumuntersuchungen einen zusätzlichen Einblick in die Durchmischung eines oberflächennahen und eines tiefen Grundwassers geben.

Da es sich bei den untersuchten Grundwasserproben stets um Wasser aus demselben Einzugsgebiet handelt, fallen Kontinental- und Höheneffekt nicht ins Gewicht; ausschlaggebend für den Gehalt des Grundwassers an den stabilen Isotopen ist lediglich die Mitteltemperatur in den Jahreszeiten erhöhter Grundwasserneubildung und ein möglicher Evaporationseinfluß, der eine Anreicherung an Deuterium und ^{18}O bewirkt.

Die Isotopengehalte werden im Massenspektrometer als Abweichung vom SMOW-Standard gemessen:

$$\delta D = \frac{R_{\text{Probe}} - R_{\text{Standard}}}{R_{\text{Standard}}} \cdot 1000 \quad (\text{‰});$$

dasselbe gilt für Sauerstoff-18, Deuterium und ^{18}O verhalten sich gleichsinnig in ihren Konzentrationsschwankungen. Zwischen δD und $\delta ^{18}\text{O}$ gilt die Relation

$$\delta D = m \cdot \delta ^{18}\text{O} + t.$$

Die Konstanten m und t sind von den meteorologischen Bedingungen bei der Entstehung des Wasserdampfs und des Niederschlags bestimmt; t liegt umso höher, je wärmer die durchschnittliche Temperatur und damit auch die Verdunstungsrate ist. DANSGAARD (1964) hat für das östliche Mittelmeergebiet mit semiariden Klimabedingungen ein t von ca. 22 ermittelt, während für das humide mitteleuropäische Klima $t \approx 10$ ist.

5.3.2 Ergebnisse

Die Meßergebnisse der δ D- bzw. $\delta^{18}\text{O}$ -Abweichungen vom Standard sind der Tabelle im Anhang zu entnehmen. Insgesamt wurden 70 Grundwasserproben aus verschiedenen tiefen und unterschiedlich ausgebauten Brunnen entnommen. Die gemessenen δ D-Werte liegen zwischen - 97,8 ‰ und - 66,5 ‰, die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte zwischen - 13,23 ‰ und - 8,83 ‰. Im Vergleich dazu liegen die gegenwärtigen Werte bei δ D = - 65 bis - 70 ‰ und $\delta^{18}\text{O}$ = - 8,5 bis - 9,0 ‰.

Die Beziehung der δ -Werte des jungtertiären Grundwassers ergibt eine Niederschlagsgerade der Form:

$$\delta \text{ D} = 8 \cdot \delta^{18}\text{O} + 6 \quad (\text{Abb. 24})$$

Gegenüber der Niederschlagsgeraden für die Jetztzeit, $\delta \text{ D} = 8 \cdot \delta^{18}\text{O} + 10$, verschiebt sie sich parallel zu niedrigeren δ D-Werten. Die Steigung (m) der Geraden ist etwa gleich groß, d.h. das Niederschlagswasser muß ohne daß es einer Evaporation ausgesetzt war, ins Grundwasser gelangt sein. Der etwas niedrigere Wert von $t = 6$ gegenüber heute $t = 10$ deutet an, daß die Grundwasserneubildung unter etwas kälteren klimatischen Bedingungen erfolgte.

Eine Korrelation der δ -Werte mit den zugehörigen ^{14}C -Grundwasseraltern zeigt, daß jene Wässer, die vor ca. 20 000 Jahren v.h. in den Grundwasserleiter gelangten, einen ca. 10 - 15 ‰ niedrigeren Deuteriumgehalt und einen 1,0 - 1,5 ‰ niedrigeren ^{18}O -Gehalt als heutige Niederschläge aufweisen; diese Wässer stammen zudem wahrscheinlich aus Sommerniederschlägen, die auch in bestimmten Zeiten der Permafrostzeit zur Versickerung gelangen konnten, während die Grundwasserneubildung heute ganz überwiegend aus den Winterniederschlägen stammt.

Eine Interpretation der Isotopengehalte aus unterschiedlichen Tiefenlagen ist am besten für das Augsburger Gebiet möglich. Hier gibt es

genügend viele Brunnen, die nur aus Schichten unterhalb etwa 80 m u. Gel. Grundwasser fördern und solche, die auch aus höherliegenden Horizonten Grundwasser entnehmen. Dazu kommt, daß hier die hydraulischen Verhältnisse auf Grund der geringeren Gesamtentnahme von Grundwasser noch nicht so sehr gestört sind wie z. B. in München.

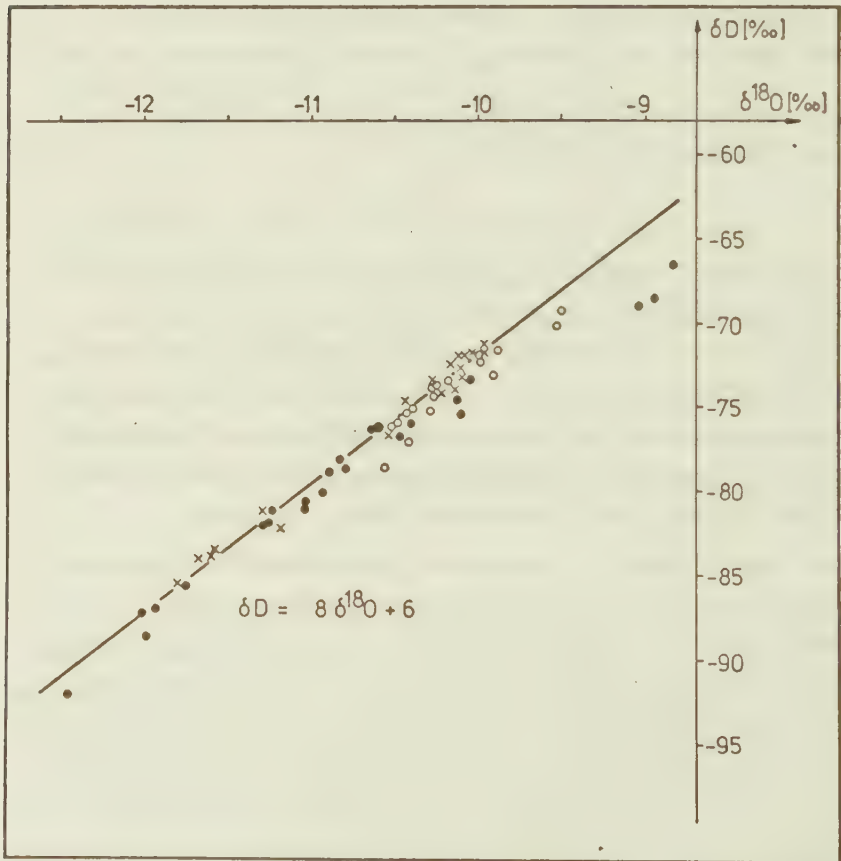


Abb. 24: Beziehung zwischen Deuterium- und Sauerstoff-18-Gehalt der jungtertiären Grundwässer aus dem Raum München-Augsburg; • = Proben aus dem Stadtgebiet München, x = Proben aus dem Stadtgebiet Augsburg, o = Proben aus dem restlichen Untersuchungsgebiet

Deutlich kommt für die Grundwasserproben aus Augsburger Tertiärbrunnen eine Zweigliederung heraus (Abb. 25):

- ein Bereich zwischen 69 m und 185 m u. Gel. mit δD -Werten zwischen - 81 ‰ und - 86 ‰ und $\delta^{18}O$ -Werten zwischen - 11,1 ‰ und - 11,8 ‰. Diese Grundwasserproben sind ausnahmslos tritiumfrei und haben ^{14}C -Modellalter um 19 000 Jahre v. h. : die Grundwasserneubildung erfolgte also unter kühleren Klimabedingungen als heute;
- ein zweiter Bereich zwischen der Tertiäroberfläche und ca. 69 m u. Gel. mit δD -Werten zwischen - 71 ‰ und - 77 ‰ und $\delta^{18}O$ -Werten zwischen - 9,9 ‰ und - 10,6 ‰. Dieses Grundwasser ist überwiegend tritiumhaltig; es entstand unter nahezu ähnlichen Klimabedingungen wie heute.

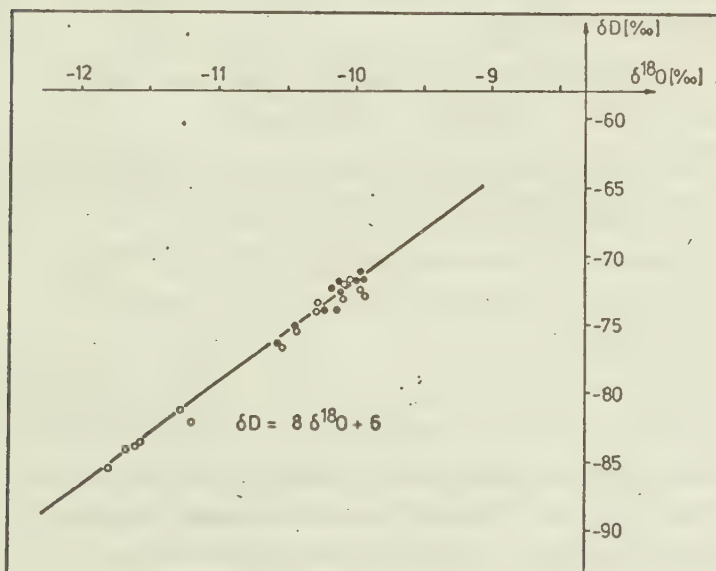


Abb. 25: Deuterium-Sauerstoff-18-Relation von Grundwasserproben aus dem Jungtertiär im Stadtgebiet Augsburg. - Die ausgefüllten Kreise kennzeichnen tritiumhaltige Grundwasserproben

Im Münchener Gebiet können diese zwei Tiefenbereiche zwar auch erkannt werden, jedoch ist ihre Grenze nicht so markant. Dennoch gilt auch für diesen Bereich:

- Grundwasser aus rd. 180 bis 250 m u. Gel. ist an stabilen Isotopen relativ abgereichert, mit δ D-Werten zwischen - 81 ‰ und - 97,8 ‰ und $\delta^{18}\text{O}$ -Werten zwischen ca. - 11 ‰ und - 12 ‰. Es dürfte sich also auch hier um pleistozäne Wässer handeln;
- Grundwasserproben, die aus Schichten zwischen 42 m und 210 m u. Gel. stammen, sind gegenüber der ersten Gruppe an stabilen Isotopen angereichert, die Grenzwerte erreichen beim Deuterium mit - 75 ‰ bis - 80 ‰ und beim ^{18}O mit Gehalten zwischen rd. - 10,5 ‰ und - 11 ‰ annähernd die Werte der ersten Gruppe. In diesem Fall könnte bereits eine Mischung unterschiedlich alter Wässer erfolgt sein.

Vergleicht man dieses Untersuchungsergebnis mit jenem der Tritium- und der ^{14}C -Meßergebnisse, so wird deutlich,

- daß durch Tritiummessungen die Untergrenze der Durchmischungszone nicht erfaßt werden kann und
- daß auch aus den ^{14}C -Wasseraltern, soweit sie unter 10 000 Jahren v. h. liegen, eine Mischung verschieden alter Wässer angenommen werden darf.

Wie das S-N-Profil der Deuteriumgehalte durch München in Abb. 26 zeigt, liegt diese Grenze zwischen den beiden δ D-Bereichen im Süden von München höher als im Stadtzentrum und weiter im Norden. Die Ursache dafür liegt, wie auch durch andere Fakten belegt, in der stärkeren Grundwasserentnahme im Stadtgebiet München. Somit bringen zwei von einander unabhängige Methoden die gleiche Aussage wie die Ergebnisse der Tritiummessungen und der ^{14}C -Bestimmungen.

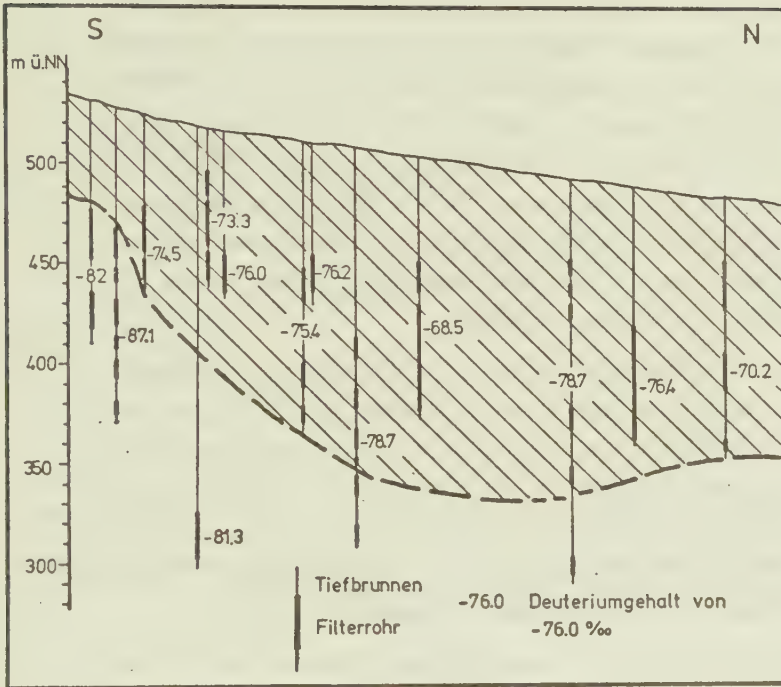


Abb. 26: Schematisches Süd-Nord-Profil der Deuteriumgehalte durch München; der schraffierte Bereich weist die höheren δD -Gehalte auf.

6. Das generelle Strömungsfeld

6.1 Die Potentialverteilung im Aquifer

LEMCKE (1956 in LEMCKE & TUNN) beschreibt eine säkulare Abwärtsbewegung des Porengrundwassers in der Molasse, das dem Druckgefälle zwischen Molasse und Malm folgt. Diese Vertikalkomponente des Druckgefälles wurde im Oberpliozän ausgelöst, als die Donau sich infolge der allgemeinen Heraushebung des Alpenvorlandes nach Süden verlegte und ihr heutiges Flußbett schuf. Auf diese Weise

wurde der Druckspiegel des Malmkarstwassers auf unterhydrostatische Werte abgesenkt; dadurch wurde die Zusicke- rung von Poren- grundwasser aus den Molasses- schichten, das unter hydrostatischen Druckverhältnissen steht, eingeleitet. Dieses Herabsinken konnte von LEMCKE (1976) anhand der um einige hundert Meter herabge- wanderten Süß-Salzwassergrenze aus der Oberen Meeresmolasse in die Untere Süßwassermolasse schlüssig nachgewiesen werden. Da ein Druckausgleich fehlt, muß ein ständiger Nachschub an zu- sickernden Tageswässern bestehen.

Die Ergebnisse der Untersuchungen LEMCKEs (1976) skizzieren den generellen Aufbau des Potentialfeldes in dem Teil der Molasse, in dem ein säkularer Grundwasserumsatz stattfindet. Die Fließ- bewegung des Grundwassers geht generell nach Norden, doch sind die Potentiallinien weit nach Süden zurückgebogen, so daß die re- sultierende Grundwasserbewegung schräg nach unten zum Malm als drainierendem Horizont gerichtet ist (Abb. 27).

Im obersten Bereich der Oberen Süßwassermolasse, dort wo die hydraulischen Verhältnisse durch zahlreiche Grundwasserbohrungen besser bekannt sind, kann der Verlauf der Potentiallinien vor allem in den Bereichen, wo nebeneinander mehrere verschieden tiefe Druckwasserschichten erschlossen sind, durch den Vergleich der unterschiedlichen piezometrischen Höhen der Grundwasserdruck- spiegel genauer erfaßt werden. Das hydraulische Potential höher- liegender Schichten ist dabei stets größer als das in grundwasser- führenden Schichten aus größerer Tiefe. So liegen z. B. im Stadt- gebiet von München die Grundwasserspiegel aus Schichten zwischen 50 und 100 m u. Gel., also um ca. 20 bis 30 m höher als die Grund- wasserspiegel aus Schichten in rund 200 - 230 m u. Gel. Aus dieser Tatsache folgt, daß die Potentiallinien auch in der OSM schaufel- förmig nach Süden ausgebogen sein müssen (Abb. 27).

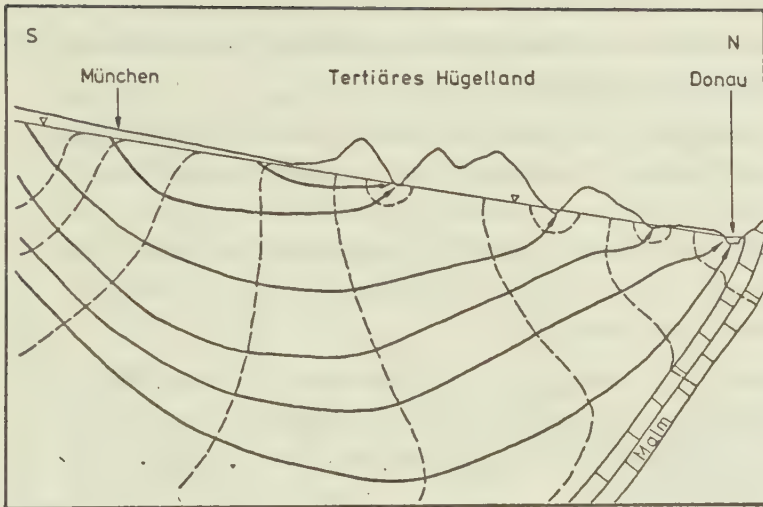


Abb. 27: Schematischer Verlauf der Potential- (gerissene Linien) und der Stromlinien (durchgezogene Linien) in der Oberen Süßwassermasse bis zur Donau (nicht maßstabgetreu)

Durch die Ergebnisse der hydrochemischen und isotopenhydrologischen Untersuchungen kann das Strömungsfeld noch genauer erfasst werden:

- Grundwasserneubildung erfolgt durch das überlagernde Quartär hindurch bzw. durch direkt ins Jungtertiär einsickernde Niederschläge, dort wo eine quartäre Überdeckung fehlt. Die Potentiallinien verlaufen daher nahe der Oberfläche grundwasserstromabwärts in spitzem Winkel gegen den Grundwasserspiegel geneigt (Abb. 27);
- im oberflächennäheren Bereich bis etwa 40 - 75 m u. Gel. (je nach der Grundwasserentnahme verschieden) herrscht ein erhöhter Grundwasserumsatz zwischen dem quartären und dem

jungtertiären Grundwasserleiter und die Fließgeschwindigkeiten sind dort höher. In diesem Bereich sind die Potentiallinien eng geschart und insgesamt steil aufgerichtet;

- unterhalb dieses Bereiches mit erhöhtem Durchsatz an neugebildetem Grundwasser nehmen die Fließgeschwindigkeiten ab und die vertikale Komponente in der Fließbewegung wird größer. Die Potentiallinien werden hier auseinandergezogen und biegen nach Süden um. Insgesamt resultiert hier bereits eine nach unten gerichtete Fließbewegung;
- das oberflächennahe, jungtertiäre Grundwasser steht in Wechselbeziehung zu den Vorflutern im Tertiärhügelland, während das tiefer gelegene Grundwasser in der OSM diese Vorfluter unterfließt;
- die Donau bzw. die Ausstrichlinie Molasse/Malm ist der nördlichst gelegene Vorfluter für das Molassegrundwasser.

Die hier beschriebene Potential- und Stromlinienverteilung ist in Abb. 27 schematisch für den gesamten Molassequerschnitt München - Donau (etwa bei Ingolstadt) dargestellt. Demnach liegt im Süden des Tertiären Hügellandes ein Gebiet mit überwiegender Grundwasserneubildung, während das jungtertiäre Grundwasser im Tertiären Hügelland und bis zur Donau hin zu den Vorflutern hochsteigt.

Um die These zu stützen, wurde der Trockenwetterabfluß im Gebiet des Tertiären Hügellandes in die Untersuchungen mit einbezogen.

6.2 Trockenwetterabfluß in Tertiärflüssen

Unter der Trockenwetterganglinie in Flüssen wird nach DIN 4049 der aus der natürlichen Rücklage eines Einzugsgebiets stammende Gang der Oberflächenabflüsse in niederschlagsarmen Perioden bezeichnet. Sie stellt ein Maß dar, inwieweit das Grundwasserreservoir dem Vorfluter tributär ist.

Nach der Geologischen Karte von Bayern kommen für eine solche Untersuchung folgende Flüsse mit ihren Pegelstationen in Frage:

- Glonn (Pegel Hohenkammer), Abens (Pegel Aunkofen), Große Vils (Pegel Vilsbiburg), Vils (Pegel Mettenhausen), Vils (Pegel Grafenmühle) und Rott (Pegel Mühlham) (Abb. 28).

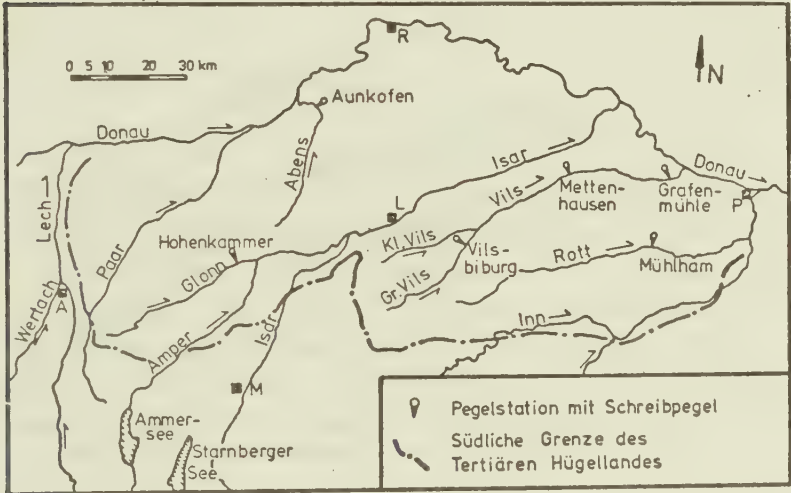


Abb. 28: Lage der Flüsse und der Flußpegelm eßstellen im Bayerischen Tertiären Hügelland. - A = Augsburg, L = Lands-hut, M = München, P = Passau, R = Regensburg

Die Trockenwetterganglinien wurden nach täglichen Abflußmittelwerten aus dem Deutschen Gewässerkundlichen Jahrbuch - Donau-gebiet für die Jahresreihe 1965 - 1970 erstellt (Abb. 29).

Die Trockenwetterganglinie läßt sich durch eine Exponentialfunktion beschreiben:

$$Q_t = Q_0 \cdot e^{-\alpha t}$$

- mit:
- Q_t = Abfluß zur Zeit t (m^3/s)
 - Q_0 = Abfluß zur Zeit $t = 0$ (m^3/s)
 - t = Beobachtungszeitpunkt (s)
 - α = Konstante (s^{-1}).

Der Exponent α ist in seinem Betrag von hydraulischen Kennwerten des Aquifers (k_f -Wert, Grundwassergefälle, nutzbare Porosität) und von der Geometrie des unterirdischen Einzugsgebiets abhängig.

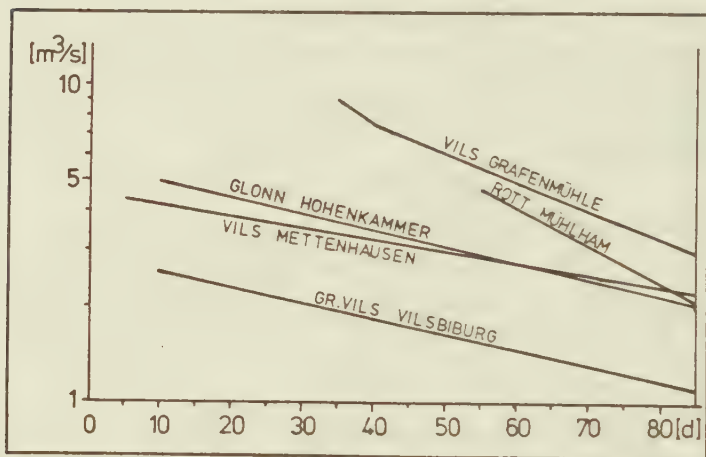


Abb. 29: Trockenwetterganglinien von Flüssen aus dem Bayerischen Tertiären Hügelland, deren Einzugsgebiet ganz im anstehenden Tertiär liegt.

Da angenommen werden kann, daß sich Schwankungen in den hydraulischen Parametern großräumig ausgleichen, ist α letztlich eine Maßzahl für die Ausdehnung des Grundwasserreservoirs. Sein Betrag ist nicht von der Größe des Niederschlagsgebietes abhängig (s. Tab. 7). Die Lösung von α erfolgt graphisch in einem halb-logarithmischen Koordinatensystem. Dazu wird die Exponentialfunktion in die lineare Beziehung

$$\ln Q_t = \ln Q_0 - (\alpha \ln e) \cdot t$$

umgeformt und nach α aufgelöst:

$$\alpha = \frac{1}{t} \cdot (\ln Q_0 - \ln Q_t).$$

In diese Gleichung werden die graphisch ermittelten Beträge von Q_0 und Q_t eingesetzt um α zu ermitteln.

Die gesamte gespeicherte Grundwassermenge (M) bzw. die Grundwassermenge, die in einem Zeitintervall unter der Voraussetzung ausfließen kann, daß keine Grundwasserneubildung stattfindet, kann durch Integration der Exponentialgleichung in den Grenzen t_0 bis t_1 errechnet werden:

$$M = Q_0 \int_{t_0}^{t_1} e^{-\alpha t} dt.$$

Durch Grenzwertbildung von t_1 gegen Unendlich erhält man den gesamten ausflußfähigen Wasserinhalt des Grundwasserreservoirs bezogen auf die Höhe des Beobachtungsortes. Durch schrittweise Vergrößerung des Zeitintervalls $t_1 - t_0$ (z. B. 0 bis 365 Tage, bis 200 d, bis 100 d usw.) kann der Zeitraum, in dem das Reservoir auslaufen würde, falls keine Grundwasserneubildung stattfände, eingegrenzt werden.

6.2.1 Ergebnisse

Die Ergebnisse der obigen Berechnungen sind in der Tab. 7 zusammengefaßt und auf MQ bzw. MNQ als Ausgangswert Q_0 bezogen. Die Werte für MQ und MNQ sind langjährige Mittelwerte aus dem Deutschen Gewässerkundlichen Jahrbuch - Donaugebiet. Da mir nur Zahlenmaterial der Jahre 1965 bis 1970 zur Verfügung stand, die Jahre 1965 - 1967 aber niederschlagsreich waren, konnte die Trockenwetterganglinie nur bei der Rott/Mühlham und der Vils/Grafenmühle bis unter MNQ bestimmt werden, bei allen anderen Pegeln nur bis knapp zum MNQ.

Der Betrag von α liegt in der Größenordnung von $3,3 \cdot 10^{-7}$ bis

Tab. 7: Exponent α und Grundwasserinhalt jener Bereiche aus dem Bayerischen Tertiären Hügelland, die zu den genannten Vorflutern entwässern

Fluß	Pegel	MQ (m ³ /s)	MNQ (m ³ /s)	α (s ⁻¹)	Wasserinhalt des Reservoirs in 10 ⁶ m ³ bez. auf			nat. Grundwasseraus- lauf über 365 d in m ³ /s		F _N (km ²)
					t → ∞ MQ	∞ → t MNQ	t → 365 d MQ	365 d → t MNQ	bezogen auf MQ	
Abens	Aunkofen	2.72	1.51	7,9·10 ⁻⁸	34.4	19.1	31.6	17.5	1.00	359
Rott	Mühlham	6.84	2.29	3,3·10 ⁻⁷	20.7	6.9	20.7	6.9	0.66	850
Glonn	Hohenkammer	3.28	1.24	1,4·10 ⁻⁷	23.4	8.9	23.1	8.7	0.73	392
Gr. Vils	Vilsbiburg	2.51	0.95	1,3·10 ⁻⁷	19.3	7.3	19.0	7.2	0.60	318
Vils	Grafenmühle	9.23	3.61	2,5·10 ⁻⁷	36.9	14.4	36.9	14.4	1.17	1436
Vils	Mettenhausen	4.97	2.23	9,5·10 ⁻⁸	52.3	23.5	49.7	22.3	1.58	732

$7,9 \cdot 10^{-8} \text{ s}^{-1}$; er ist unabhängig von der Größe des Niederschlagsgebietes (F_N in Tab. 7), er hängt allein von der Geometrie des unterirdischen Einzugsgebietes ab.

Die Reservoirs mit $\alpha > 1 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ entleeren sich innerhalb eines Jahres vollständig. Trägt man α gegen das Zeitintervall auf, in dem sich der Grundwasserspeicher ohne Grundwasserneubildung entleeren würde, ergibt sich eine lineare Beziehung (Abb. 30): der Grundwasservorrat eines Reservoirs erschöpft sich umso schneller, je größer der Betrag von α ist.

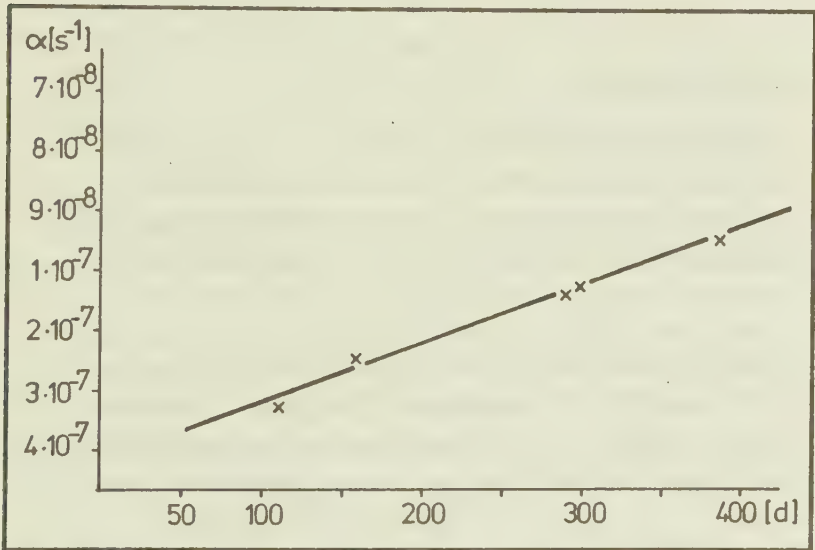


Abb. 30: Beziehung zwischen α und dem Zeitraum, in dem der Grundwasserspeicher ohne Grundwasserneubildung leerlaufen würde.

Der gesamte, frei abflußfähige Grundwasserinhalt der einzelnen in Tab. 7 dargestellten Reservoirs hängt anscheinend davon ab, wie weit der betrachtete Auslaufquerschnitt des Grundwasserleiters von der südlichen Grenze des Tertiären Hügellandes entfernt ist. Je wei-

ter die Pegelmeßstellen von dieser Grenze entfernt sind, desto größer ist der auslauffähige Grundwasserinhalt der jeweiligen Reservoirs. Für die weiter am nördlichen Molasserand gelegenen Flüsse, wie z. B. für die Abens, muß folglich ein größeres unterirdisches Einzugsgebiet zur Verfügung stehen als für jene Flüsse, deren Pegelmeßstellen weiter im Süden und damit näher an der Grenze zu den quartären Nieder- und Hochterrassenschottern liegen. Diese Aussage wird qualitativ durch das generelle Strömungsfeld, wie es in Abb. 27 dargestellt ist, belegt.

7. Zusammenfassung

1. Die Obere Süßwassermolasse besteht aus einer unregelmäßigen Abfolge von limnischen und fluviatilen Sedimenten, die im Untersuchungsgebiet generell von Osten in das Sedimentationsbecken gelangten. Ihr Alter reicht nach Fossilfunden vom oberen Torton bis zum Pont.
2. Strukturell ist die OSM eine asymmetrische Mulde, deren Achse etwa ENE-WSW streicht und mit ca. 3 ‰ in westliche Richtung abtaucht. Das Untersuchungsgebiet liegt im Bereich des mit rd. 5 ‰ nach Süden einfallenden Nordschenkels dieser Mulde.
3. Die OSM kann in drei Serien gegliedert werden, die sich durch ihre durchschnittlichen Korngrößen voneinander unterscheiden:
 - die feinkörnige Untere Serie besteht hauptsächlich aus Ton- bis Sandmergeln; sie wird im Süden etwa 250 m mächtig. Ihre Mächtigkeit nimmt im Nordteil des Untersuchungsgebietes bis auf ca. 100 m ab. Im Gegensatz zu den grobkörnigeren Sedimenten der Mittleren und Oberen Serie spielt

diese Schichtfolge für die Grundwassererschließung aus dem Jungtertiär nur eine untergeordnete Rolle.

- Die Mittlere Serie ist durch ihre grobklastischen Sedimente gegen die Untere Serie abgrenzbar; sie entspricht der Hauptschotterschüttung Ostniederbayerns (Nördlicher und Südlicher Vollschotter). Im Ostteil erreicht die Mittlere Serie Mächtigkeiten um 100 m. Dort sind in sie zusammenhängende Kiesschichten bis zu ca. 45 m Mächtigkeit eingelagert. Nach Westen sind in diese Kiesschichten zunehmend Ton- und Mergelschichten eingeschaltet; in dieser Richtung werden auch die Korngrößen der Grobklastika geringer. Die Gesamtmächtigkeit dieser als Hauptschotteräquivalente bezeichneten Serie schwankt im Arbeitsgebiet zwischen etwa 100 m und 150 m.
 - Den Abschluß der OSM nach oben bilden wieder etwas feinkörnigere Sedimente; vereinzelt sind in die Obere Serie zwar auch noch Feinkiesschichten eingelagert, doch kann in zunehmendem Maße eine sich wiederholende Abfolge von Flinzmergel- und Flinzsandschichten beobachtet werden. Die größte Mächtigkeit erreicht der sog. "Feinflinz" im Südteil, wo die von der oberpliozänen und pleistozänen Erosion erhalten gebliebenen Restmächtigkeiten in der Zone der Muldenachse auf der Linie München - Landsberg noch ca. 100 m betragen. Gegen Norden dünnt die Obere Serie rasch aus; sie ist im Bereich der Hauptschotterschüttung nur noch als dünne Auflage erhalten.
4. Ergiebige Grundwasserleiter sind vor allem die Kies- und Sandschichten der Mittleren und Oberen Serie. Das Grundwasser ist meistens gespannt, die entlasteten Druckspiegel liegen um so tiefer, je tiefer die grundwasserführende Schicht liegt. Die Steighöhen nehmen dagegen mit zunehmender Tiefenlage zu.

5. In der Oberen Süßwassermolasse liegt ein zusammenhängender großräumiger Grundwasserkörper vor, in dem sich Druckschwankungen über den gesamten Aquifer ziemlich einheitlich auswirken.
6. Die Grundwasserdruckfläche fällt im südlichen und im nördlichen Teilgebiet mit ca. 3,5 - 5 ‰ nach Norden ein, im mittleren Abschnitt beträgt das Druckspiegelgefälle nur noch 1,5 bis 3 ‰. Im Bereich der Stadtgebiete von München und Augsburg macht sich jeweils die starke Grundwasserentnahme durch weitreichende Absenkbereiche bemerkbar. Nach dem Grundwasserhöhengleichenplan ist die allgemeine Fließrichtung des Grundwassers im Jungtertiär von Süd nach Nord gerichtet. Das oberflächennahe Grundwasser des Jungtertiärs tritt lokal in Wechselwirkung mit Vorflutern, das tiefere Grundwasser der Oberen Süßwassermolasse wird dagegen in seiner Fließbewegung nicht mehr von Vorflutern beeinflusst.
7. Die spezifischen Ergiebigkeiten des Aquifers sind im allgemeinen gering, sie nehmen mit zunehmender Bohrtiefe zu. Im feinkörnigeren südlichen Bereich liegen sie meistens unter 1 l/s·m, während sie weiter nördlich, vor allem im Gebiet um Freising und Dachau, zwischen 1 und 2 l/s·m liegen, mit Maximalwerten bis zu 5 l/s·m.
8. Die Durchlässigkeitsbeiwerte der kiesigen und sandigen Schichten liegen zwischen 10^{-3} m/s und 10^{-7} m/s und weisen ein ausgeprägtes Maximum bei $1 - 3 \cdot 10^{-5}$ m/s auf. Durchlässigkeitsbeiwerte, die durch Pumpversuche und durch Laboruntersuchungen bestimmt wurden, stimmen recht gut miteinander überein.

Die regionale Verteilung der Transmissivitäten des jungtertiären Grundwasserleiters entspricht dem geologischen Aufbau der

OSM. Im Bereich der Hauptschotterschüttung werden mittlere Transmissivitäten zwischen etwa $1,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ und $12,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ ermittelt, während im südlichen Randbereich die Transmissivitäten mit Werten, die meist kleiner als $1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ sind, niedrig sind. Auf Grund der regionalen Verteilung der Transmissivitäten ergibt sich im südlichen Teilgebiet einschließlich der Stadtgebiete von München und Augsburg bei einem durchschnittlichen Gefälle von 2 - 3 ‰ ein mittlerer Durchfluß pro Kilometer Aquiferbreite von 2 - 5 l/s, während im Gebiet der Hauptschotterschüttung bei einem Gefälle von 3 - 4 ‰ sich ein Durchfluß von 10 - 20 l/s und Kilometer Breite errechnet.

Aus diesen Durchflußdaten kann gefolgert werden, daß der natürliche Zufluß an Tertiärgrundwasser zu den Räumen München und Augsburg niemals ausreichen kann, um die Grundwasserförderung von $2,7 \text{ m}^3/\text{s}$ bzw. $1,3 \text{ m}^3/\text{s}$ zu decken. Das jungtertiäre Grundwasser muß demnach außer den horizontalen Zuflüssen aus der OSM noch weitere Quellen der Grundwasserneubildung, z. B. das quartäre Grundwasser, besitzen. Das gleiche gilt auch für das nördliche Arbeitsgebiet mit Transmissivitätswerten, die größer sind als jene im südlich davon gelegenen Zuflußgebiet.

9. Die Filtergeschwindigkeit v_f kann nach der Kontinuitätsgleichung unter Einbeziehung der aktivierten Zuflüsse aus quartären Grundwasserleitern sowie nach dem DARCYschen Gesetz ohne Berücksichtigung dieser Zuflüsse berechnet werden. Im beanspruchten Grundwasserleiter kann eine Filtergeschwindigkeit von rd. $0,03 \text{ m/d}$ bzw. rd. 12 m/a errechnet werden, während sie für den Fall eines unbeanspruchten Grundwasserleiters mit rd. $0,003 \text{ m/d}$ bzw. $1,1 \text{ m/a}$ um eine Größenordnung niedriger ist. Aus dem Vergleich dieser beiden Werte wird ersichtlich, welche Veränderungen der

Strömungsverhältnisse die Grundwasserentnahme aus dem Jungtertiär bereits bewirkt hat.

Bei durchschnittlichen nutzbaren Porositäten zwischen 0,2 und 0,4 errechnen sich bei einem Förderbetrieb der Brunnen daraus Abstandsgeschwindigkeiten von 0,08 m/d (29,3 m/a) bis 0,17 m/d (64 m/a) unter Berücksichtigung der durch die Grundwasserentnahme aktivierten Fremdzuflüsse. Für den Fall der ungestörten Fließbewegung im jungtertiären Grundwasserleiter liegen die Abstandsgeschwindigkeiten zwischen 0,008 m/d (2,75 m/a) und 0,015 m/d (5,5 m/a).

10. In Oberflächennähe überwiegt das Calciumhydrogenkarbonat-Grundwasser; seine chemische Zusammensetzung ist ähnlich wie die der quartären Kalkschotterwässer. Mit zunehmender Entnahmetiefe geht dieser Grundwassertyp in ein Natriumhydrogenkarbonatwasser über. Der Übergang vollzieht sich mehr oder weniger rasch in Tiefen zwischen 50 und 60 m u. Gel. Diese beiden Grundwassertypen im Jungtertiär zeigen an, daß ein oberflächennaher Teil des jungtertiären Grundwassers wohl direkt aus dem Quartär stammt und daß ein tieferer Teil des Grundwassers erst die typischen Merkmale von "Tertiärgrundwässern" aufweist.
11. Nach den Isotopenuntersuchungen können verschieden alte Grundwässer unterschieden werden. In München werden unterhalb rd. 190 m Tiefe und in Augsburg unterhalb rd. 85 m Tiefe ^{14}C -Modellalter von 19 000 bis 20 000 Jahren v. h. angetroffen. Nach ihren D- und ^{18}O -Gehalten zu schließen, haben sich diese Grundwässer unter kühleren Klimabedingungen, als sie heute herrschen, gebildet. Grundwässer mit einem Alter zwischen rd. 19 000 und 10 000 Jahren v. h. fehlen; anscheinend erfolgte in diesem Zeitraum keine Grundwasserneubildung, weil die durch den Perma-

frost versiegelten Böden keine Versickerung des Niederschlagswassers zuließen. Zwischen rd. 40 m und 130 m u. Gel. konnten Grundwässer mit ^{14}C -Modellaltern zwischen 6 000 und 2 000 Jahren v.h. festgestellt werden. Für die Bildung dieses jungtertiären Grundwassers darf man Klimabedingungen annehmen, die annähernd den heutigen Klimabedingungen entsprechen. Diese Wasseralter weisen mit Sicherheit auf ein Mischwasser von tritiumfreien Wässern hin, die jünger als 10 000 Jahre v.h. sind. Die Vermischung dieser Wässer wird durch die Grundwasserförderung eingeleitet und in Gang gehalten. Im höheren Bereich des Grundwasserleiters zwischen Geländeoberkante und 40 - 60 m Tiefe tritt tritiumhaltiges Grundwasser auf; es stammt aus der Zeit nach 1953 und weist bei seinem Übergang in tieferes, tritiumfreies Grundwasser eine Durchmischungszone unterschiedlicher Dicke und unterschiedlicher Tiefenlage auf. Sie liegt zwischen rd. 30 - 45 m u. Gel. in Gebieten ohne und rd. 45 - 75 m u. Gel. in Gebieten mit größerer Grundwasserentnahme. Gemeinsam mit der darunterliegenden, jedoch tritiumfreien Durchmischungszone ist sie Ausdruck einer starken Grundwasserförderung. Sie kommt wohl dadurch zustande, daß mehr Grundwasser gefördert wird als unter natürlichen Verhältnissen zufließt. Der jungtertiäre Grundwasserleiter wird demnach bereits mit Sicherheit überbeansprucht. Er gleicht aber diese Überbeanspruchung dadurch aus, daß er auf kurzem Wege Grundwässer aus quartären Grundwasserleitern nachzieht; das deutet auch die o. a. Durchmischungszone zwischen tieferem tritiumfreiem und höherem tritiumhaltigem Grundwasser an. Der Lage dieser Durchmischungszone bzw. ihrem weiteren Absinken sollte bei späteren Arbeiten über den jungtertiären Grundwasserleiter unsere Aufmerksamkeit gelten.

12. Grundwasser, das südlich des Tertiären Hügellandes neugebildet wird, steigt z. T. in den Grundwasserleiter hinab, fließt nach

Norden und gelangt im Tertiären Hügelland und an der Donau wieder in seine Vorfluter. Je näher man der Donau kommt, desto höher wird der Trockenwetterabfluß, unabhängig von der Größe des Niederschlagsgebiets des Vorfluters. Dieser erhöhte Zufluß stammt aus südlich gelegenen Gebieten außerhalb des Niederschlagsgebietes.

8. Literaturverzeichnis

- ABELE, G., FUCHS, B. & STEPHAN, W. (1955): Die westliche bayerische Vorlandmolasse. - In: Erläuterungen zur geologischen Übersichtskarte der Süddeutschen Molasse 1:300 000, S. 46 - 58, 2 Abb., München (Bayer. Geol. LA).
- ANDRES, G. & GEYH, M.A. (1970): Untersuchungen über den Grundwasserhaushalt im überdeckten Sandsteinkeuper mit Hilfe von ^{14}C - und ^3H -Wasseranalysen. - Die Wasserwirtschaft, 60, H. 8, S. 259 - 263, 2 Abb., 1 Taf., Stuttgart.
- (1972): Paläohydrologische Studien mit Hilfe von ^{14}C über den pleistozänen Grundwasserhaushalt in Mitteleuropa. - Die Naturwissenschaften, 59, H. 9, S. 418 - 420, 1 Abb., Berlin.
- ANDRES, G. & PFEIFFER, D. (1956): Hydrogeologische Übersichtskarte 1:100 000 Blatt Augsburg mit Erläuterungen. - 154 S., 13 Abb., 39 Tab., Remagen (Bundesanstalt für Landeskunde).
- BEGEMAN, F. & LIBBY, W.F. (1957): Continental water balance groundwater inventory and storage time, surface ocean mixing rates and worldwide water circulation patterns from cosmic-ray and bomb tritium. - Geochim. Cosmochim. Acta, 12, S. 277 - 296, 7 Abb., 11 Tab., London.
- BIESKE, E. & BIESKE, E. (1973): Bohrbrunnen. - 398 S., 252 Abb., 18 Tab., München (Oldenbourg).
- BLASY, L. (1974): Die Grundwasserverhältnisse in der Münchener Schotterebene westlich der Isar. - Inaugural-Dissertation TU München, 103 S., 22 Abb., 9 Tab., München.
- BLISSENBACH, E. (1957): Die jungtertiäre Grobschottererschüttung im Osten des bayerischen Molassetroges. - Beih. Geol.Jb., 26, S. 9 - 48, 14 Abb., 6 Tab., Hannover.
- BREDENKAMP, D.B., SCHUTTE, J.M. & DU TOIT, G. (1974): Recharge of a dolomitic aquifer as determined from tritium profiles. - In: Isotope Techniques in Groundwater Hydrology, S. 73 - 94, 7 Abb., 4 Tab., Wien (IAEA).
- BRUNNACKER, K. (1959): Geologische Karte von Bayern 1:25000. Erläuterungen zu Blatt Nr. 7636 Freising Süd. - 94 S., 8 Abb., 8 Tab., 1 Beil., München (Bayer.Geol. LA).
- (1962): Geologische Karte von Bayern 1:25 000. Erläuterungen zu Blatt Nr. 7536 Freising Nord. - 84 S., 8 Abb., 8 Tab., 1 Beil., München (Bayer.Geol.LA).

- BRUNNACKER, K., PAULUS, B., BROCKERT, M., HINSCH, W. & VIDAL, H. (1964): Geologische Karte von Bayern 1:25 000. Erläuterungen zu Blatt Nr. 7736 Ismaning. - 99 S., 7 Abb., 9 Tab., 3 Beil., München (Bayer.Geol. LA).
- BUSCH, K.-F. & LUCKNER, L. (1974): Geohydraulik. - 429 S., 277 Abb., 58 Tab., Stuttgart (Enke).
- CRAIG, H. (1961 a): Isotopic variations in meteoric waters. - Science, 133, S. 1702 - 1703, 1 Abb., Washington.
- (1961 b): Standards for reporting concentrations of deuterium and oxygen-18 in natural waters. - Science, 133, S. 1833 - 1834, Washington.
- DANSGAARD, W. (1964): Stable isotopes in precipitation. - Tellus, 16, S. 436 - 468, 23 Abb., 12 Tab., Uppsala.
- DAVIS, S.N. & DE WIEST, R.J.M. (1966): Hydrogeology. - 463 S., 212 Abb., 32 Tab., New York (J. Wiley & Sons).
- DAVIS, G.H., PAYNE, B.R., DINCER, T., FLORKOWSKI, T. & GATTINGER, T. (1967): Seasonal variations in the tritium content of groundwaters of the Vienna Basin, Austria. - In: Isotopes in Hydrology, S. 451 - 473, 9 Abb., 1 Tab., Wien (IAEA).
- DEHM, R. (1955): Die Säugetier-Faunen in der Oberen Südwassermolasse und ihre Bedeutung für die Gliederung. - In: Erläuterungen zur Geologischen Übersichtskarte der Süddeutschen Molasse 1:300 000, S. 81 - 88, München (Bayer.Geol. LA).
- DIEZ, T. (1973): Geologische Karte von Bayern 1:25 000. Erläuterungen zu Blatt Nr. 7951 Landsberg a. Lech. - 78 S., 19 Abb., 3 Tab., München (Bayer.Geol. LA).
- DIN 4023 (1975): Baugrund- und Wasserbohrungen. Zeichnerische Darstellung der Ergebnisse. - 8 S., 2 Abb., 5 Tab., Berlin.
- DIN 4049, Blatt 1 (1954): Gewässerkunde, Fachausdrücke und Begriffsbestimmungen. Teil I: quantitativ. - 26 S., 10 Abb., 1 Taf., Berlin.
- DIN 4049, Teil 22 - Entwurf (1977): Hydrologie. Begriffe, quantitativ. - 35 S., 8 Abb., Berlin.
- DOWNING, R.A., SMITH, D.B., PEARSON, F.J., MONKHOUSE, R.A., OTLET, R.L. (1977): The age of groundwater in the Lincolnshire limestone, England and its relevance to the flow mechanism. - J.Hydrol., 33, S. 201 - 216, 3 Abb., 2 Tab., Amsterdam.

- DROST, W., MOSER, H., NEUMAIER, F., RAUERT, W. (1972): Isotopenmethoden in der Grundwasserkunde. - Informationsheft Büro Eurisotop, 61, 178 S., 66 Abb., 6 Tab., Brüssel.
- DURBAUM, H. (1967): Zur Bestimmung der Transmissivität von Lockergesteinsgrundwasserleitern aus Pumpversuchen. - Memoires, Bd. VII, S. 65 - 68, Hannover.
- (1968): Zur Auswertung hydrologischer Pumpversuche. - Bbr, 19, H. 12, S. 427 - 433, 4 Abb., 4 Tab., Köln.
- EICHLER, R. (1964): Deuterium-Isotopengeochemie des Grund- und Oberflächenwassers. - Geol.Rdsch., 55, S. 144 - 159, 11 Abb., 2 Tab., Stuttgart.
- EPSTEIN, S. & MAYEDA, T. (1953): Variations of the ¹⁸O content of waters from natural sources. - Geochim. Cosmochim. Acta, 4, S. 213 - 224, 3 Abb., 1 Tab., London.
- EXLER, H.J. (1967): Hydrogeologische Profile der V-Bahn-Trasse zwischen Haupt- und Ostbahnhof der Landeshauptstadt München. - Dt. Gewässerkundl. Mitt., Sonderheft, S. 101 - 111, 9 Abb., 3 Tab., Koblenz.
- FUCHS, B. (1953): Die Obere Süßwassermolasse in Bayrisch Schwaben. - N.Jb.Geol. u. Paläontol., Abh. 97, S. 283 - 293, Stuttgart.
- FÜCHTBAUER, H. (1956): Zur Sedimentologie der Oberen Süßwassermolasse des Alpenvorlandes. - Z. Deutsch. Geol. Ges., 106, S. 478 - 480, Hannover.
- (1967): Die Sandsteine in der Molasse nördlich der Alpen. - Geol. Rdsch., 56, S. 266 - 300, 12 Abb., Stuttgart.
- GANSS, O. (1955): Das deutsche Molassebecken. - Z. Deutsch. Geol. Ges., 105, S. 303 - 306, 1 Abb., Hannover.
- GAT, J.R. (1971): Comments on the stable isotope method in regional groundwater investigations. - Water Resources Res., 7, S. 980 - 993, 4 Abb., Washington.
- GEBHARDT, P. (1968): Die geologischen und hydrologischen Verhältnisse beim Münchener U-Bahn-Bau. - Inaugural-Dissertation Univ. München, 144 S., 29 Abb., 33 Tab., 40 Taf., 2 Beil., München.
- GERB, L. (1958): Grundwassertypen. - Vom Wasser, Jb. Wasserchem. u. Wasserreinigungstechnik, 25, S. 16 - 47, Weinheim (Verlag Chemie).
- GEYH, M.A. (1970): Carbon-14 concentration of lime in soils and aspects of the carbon-14 dating of groundwater. - In: Isotope Hydrology, S. 215 - 223, 1 Abb., 2 Tab., Wien (IAEA).

- GEYH, M.A. (1972): Die ^{14}C - und ^3H -Methode in der angewandten Hydrologie. - Wasserkalender 1972, S. 18 - 36, 5 Abb., Düsseldorf.
- (1974): Erfahrungen mit der ^{14}C - und ^3H -Methode in der angewandten Hydrogeologie. - Österr. Wasserwirtschaft, 26, H. 3/4, S. 49 - 54, 4 Abb., Wien.
- GEYH, M.A. & KUCKELKORN, O.F. (1969): Zur Gliederung eines Grundwasserkörpers mit Hilfe von ^{14}C - und ^3H -Konzentrations-Bestimmungen an Wasserproben. - GWF, 110, H. 50, S. 1394 - 1397, 2 Abb., 1 Tab., München.
- GEYH, M.A. & WENDT, I. (1965): Results of water sample dating by means of the model of Munnich und Vogel. - In: Radiocarbon and Tritium Dating Conf., CONF - 650652 Chemistry, S. 597 - 603, 5 Abb., Pullman, Washington.
- GRAUL, H. (1939): Schotteranalytische Untersuchungen im oberdeutschen Tertiärhügelland. - Abh. Bayer. Akad. Wiss. (Math. Naturw. Kl.) NF 46, S. 1 - 56, 9 Abb., 7 Tab., 1 Karte, München.
- GRIMM, W.-D. (1957): Sedimentpetrographische Untersuchungen der Molasse-Bohrungen Schwabmünchen 1, Siebnach 1 und Rieden 1. - Geol. Bav., 33, S. 5 - 35, 4 Abb., 10 Beil., München.
- JOB, C. (1970): Die Verwendung atmosphärischen Tritiums und anderer Radionuklide zu hydrogeologischen Untersuchungen. - Steir. Beitr. Hydrogeol., 22, S. 215 - 230, 3 Abb., Graz.
- KAUFMAN, S. & LIBBY, W.F. (1954): The natural distribution of tritium. - Phys. Rev., 93, S. 1337 - 1344, New York.
- KELLER, G. (1969): Angewandte Hydrogeologie. - 411 S., 240 Abb., 38 Taf., Hamburg (Wasser und Boden).
- KERN, H. (1954): Niederschlags-, Verdunstungs- und Abflusskarten von Bayern (Jahresmittel 1901/1951). - Veröff. Bayer. Landesstelle Gewässerk., 12 S., 4 Karten, München.
- KLEIN, S. (1937): Der oberste Feinflinz im Alpenvorland und südlichen Tertiärhügelland. - Z. Deutsch. Geol. Ges., 89, H. 7, S. 384 - 409, 3 Abb., Berlin.
- (1940): Über Alter und Lagerungsweise sog. Schweißsande im Untergrund Münchens und dessen Umgebung. - Zbl. Mineral. usw., Abt. B, Nr. 11, S. 333 - 349, 1 Abb., Stuttgart.

- KÖWING, K., KRAUS, I. & RÜCKERT, G. (1968): Geologische Karte von Bayern 1:25 000. Erläuterungen zu Blatt Nr. 7837 Markt Schwaben. - 147 S., 19 Abb., 7 Tab., 1 Beil., München (Bayer. Geol. LA).
- KRUSEMAN, G.P. & DE RIDDER, N.A. (1973): Untersuchung und Anwendung von Pumpversuchsdaten. - 191 S., 61 Abb., 18 Tab., Köln-Braunsfeld (Müller).
- LEMCKE, K. (1955): Die Fazies der Molasse der Bohrung Scherstetten 1. - Geol. Bav., 24, S. 12 - 21, 1 Taf., München.
- (1972): Die Lagerung der jüngsten Molasse im nördlichen Alpenvorland. - Bull. Ver. Schweizer. Petrol.-Geol. u. -Jng., Vol. 39, Nr. 95, S. 29 - 41, 7 Abb., Basel.
 - (1973): Zur nachpermischen Geschichte des nördlichen Alpenvorlandes. - Geol. Bav., 69, S. 5 - 48, 11 Abb., 2 Beil., München.
 - (1976): Übertiefe Grundwasser im süddeutschen Alpenvorland. - Bull. Ver. Schweizer. Petrol.-Geol. u. -Jng., Vol. 42, Nr. 103, S. 9 - 18, 4 Abb., Basel.
- LEMCKE, K., v. ENGELHARDT, W. & FUCHTBAUER, H. (1953): Geologische und sedimentpetrographische Untersuchungen im Westteil der ungefalteten Molasse des süddeutschen Alpenvorlandes. - Beih. Geol. Jb., 11, 109 + 64 S., 31 Abb., 9 Taf., 72 Tab., Hannover.
- LEMCKE, K. & TUNN, W. (1956): Tiefenwasser in der süddeutschen Molasse und in ihrer verkarsteten Malmunterlage. - Bull. Ver. Schweizer. Petrol.-Geol. u. -Jng., Vol. 23, Nr. 64, S. 35 - 56, 7 Abb., 2 Tab., Basel.
- LOGAN, J. (1964): Estimating transmissibility from routine production tests of water-wells. - Groundwater, 2, Nr. 1, S. 35 - 37, Amsterdam.
- LOHR, A. (1967): Beitrag zur Interpretation des Pumpversuchs als instationärer Vorgang. - GWF, 108, H. 26, S. 725 - 733, 4 Abb., München.
- MAROTZ, G. (1968): Technische Grundlagen einer Wasserspeicherung im natürlichen Untergrund. - Mitt. Inst. f. Wasserwirtschaft, Grundbau und Wasserbau der Universität Stuttgart, H. 9, 228 S., 96 Abb., 14 Tab., Stuttgart.
- MATTHESS, G. (1973): Die Beschaffenheit des Grundwassers. - 324 S., 89 Abb., 86 Tab., Berlin (Borntraeger).
- MATTHESS, G., MÜNNICH, K.O. & SONNTAG, C. (1976): Practical problems of groundwater model ages for groundwater protection studies.- In: Interpretation of environmental isotope and hydrochemical data in groundwater hydrology, S. 185 - 194, 6 Abb., 2 Tab., Wien (IAEA).

- MATTHESS, G., THILO, L., ROETHER, W. & MÜNNICH, K.O. (1968): Tritiumgehalte im Wasser tieferer Grundwasserstockwerke.- GWF, 109, S. 353 - 355, 1 Tab., München.
- MINISTERIUM für Ernährung, Landwirtschaft und Umwelt, BADEN-WÜRTTEMBERG (1976): Pumpversuche in Porengrundwasserleitern.- Arbeitsblatt Min. f. Ernährung, Landwirtschaft und Umwelt, Baden-Württemberg, 125 S., 10 Abb., 12 Anl., Stuttgart.
- MOOK, W.G. (1970): Stable carbon and oxygen isotopes of natural waters in the Netherlands.- In: Isotope Hydrology, S. 163 - 189, 15 ;bb., 4 Tab., Wien (IAEA).
- (1976): The dissolution-exchange model for dating groundwater with ^{14}C .- In: Interpretation of environmental isotope and hydrochemical data in groundwater hydrology, S. 213 - 225, 2 Abb., 2 Tab., Wien (IAEA).
- MOSER, H. & NEUMAIER, F. (1957): Die Anwendung radioaktiver Tracer in der Hydrologie. I. Ein Verfahren zur Ermittlung von Zu- und Abflüssen von Wasserläufen.- Atomkernenergie, 2, S. 1 - 3, München.
- (1959): Über eine Verwendung radioaktiver Isotope in der Hydrologie.- GWF, 100, S. 657 - 659, München.
- MOSER, H., NEUMAIER, F. & RAUERT, W. (1963): New experiences with the use of radioactive isotopes in hydrology.- In: Radioisotopes in Hydrology, S. 283 - 295, 7 Abb., Wien (IAEA).
- MOSER, H. & STICHLER, W. (1971): Verwendung des Deuterium- und Sauerstoff-18-Gehalts bei hydrologischen Untersuchungen.- Geol. Bav., 64, S. 7 - 35, 26 Abb., 1 Tab., München.
- MOSER, H., STICHLER, W. & ZÖTL, J. (1972): Altersgliederung von tiefliegenden artesischen Wassern durch Messung des Deuterium-Gehalts.- Naturwiss., 59, H. 3, S. 122 - 123, 1 Abb., Berlin.
- MÜNNICH, K.O. (1957): Messung des ^{14}C -Gehalts von hartem Grundwasser.- Naturwiss., 44, S. 32 - 39, Berlin.
- (1959): Die ^{14}C -Methode.- Geol. Rdsch., 49, S. 237 - 244, 4 Abb., Stuttgart.
- (1968): Isotopen-Datierung von Grundwasser.- Naturwiss., 55, H. 4, S. 158 - 163, 4 Abb., Berlin.
- MÜNNICH, K.O. & ROETHER, W. (1963): A comparison of carbon-14 and tritium ages of groundwater.- In: Radioisotopes in Hydrology, S. 397 - 404, 2 Abb., 1 Tab., Wien (IAEA).

- MÜNNICH, K.O., ROETHER, W. & THILO, L. (1967): Dating of groundwater with tritium and ^{14}C .- In: Isotopes in Hydrology, S. 305 - 319, 10 Abb., Wien (IAEA).
- MÜNNICH, K.O. & VOGEL, J. (1959): C-14-Altersbestimmungen von Grundwasser.- Naturwiss., 46, S. 10 - 12, 1 Abb., 1 Tab., Berlin.
- (1962): Untersuchungen an pluvialen Wässern der Ost-Sahara.- Geol. Rdsch., 52, S. 611 - 624, 5 Abb., 1 Tab., Stuttgart.
- MUTSCHMANN, J. & STIMMELMAYR, F. (1967): Taschenbuch der Wasserversorgung.- 847 S., 494 Abb., 3 Bildtaf., 320 Zahlentaf., Stuttgart (Franckh).
- NEUMAIER, F. (1955): Das ostniederbayerische Tertiär.- In: Erläuterungen Geol. Übersichtskarte Südd. Molasse 1:300 000, S. 68 - 80, 2 Abb., München (Bayer. Geol. LA).
- (1957): Geologische und sedimentpetrographische Untersuchungen in der ungefalteten Molasse Niederbayerns.- Beih. Geol. Jb., 26, S. 1 - 7, 1 Abb., 1 Taf., Hannover.
- PEARSON, F.J. & HANSHAW, B.B. (1970): Sources of dissolved carbonate species in groundwater and their effects on carbon-14 dating.- In: Isotope Hydrology, S. 271 - 286, 4 Abb., 1 Tab., Wien (IAEA).
- PENCK, A. & BRÜCKNER, E. (1909): Die Alpen im Eiszeitalter. Bd. 1: Die Eiszeiten in den nördlichen Ostalpen.- 393 S., 11 Taf., 8 Karten, Leipzig (Tauchnitz).
- RAUERT, W. (1971): Über Messungen von Tritium und Kohlenstoff-14 bei hydrologischen Untersuchungen.- Geol. Bav., 64, S. 36 - 74, 11 Abb., München.
- RICHTER, W. & LILLICH, W. (1975): Abriß der Hydrogeologie.- 281 S., 96 Abb., 18 Tab., Stuttgart (Schweizerbart).
- ROETHER, W. (1967): Estimating the tritium input to groundwater from wine samples: groundwater and direct run-off contribution to Central European surface waters.- In: Isotopes in Hydrology, S. 73 - 90, 7 Abb., 3 Tab., Wien (IAEA).
- SALAMEH, E. (1974): Hydrogeologie und Hydrochemie des nord-westlichen Bereiches der Münchener Schotterebene und des angrenzenden Tertiärs zwischen Isar und Paar.- Inaugural-Dissertation TU München, 168 S., 22 Abb., München.
- SCHAEFER, I. (1957): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Augsburg und Umgebung 1:50 000.- 92 S., 5 Abb., 2 Beil., München (Bayer. Geol. LA).

- SCHIRM, E. (1968): Die hydrogeologischen Verhältnisse der Münchener Schotterebene östlich der Isar.- Inaugural-Dissertation Univ. München, 139 S., 20 Abb., 13 Taf., 5 Karten, München (Bayer. Landesstelle f. Gewässerkunde).
- SCHMEER, D. (1955): Sedimentpetrographische Beobachtungen aus der Oberen Süßwassermolasse im Bereich von Freising bis Landshut.- Z. Deutsch. Geol. Ges., 105, S. 496 - 516, 1 Abb., Hannover.
- SCHULER, G. (1973): Über Durchlassigkeitsbestimmungen durch hydraulische Bohrlochversuche und ihre Ergebnisse in tertiären Flinssanden (Obere Süßwassermolasse) Süddeutschlands.- bbr, 24, H. 8, S. 291 - 299, 6 Abb., 5 Tab., Köln.
- SCHWILLE, F. (1953): Natriumhydrogenkarbonat- und Natriumchlorid-Wasser im tieferen Untergrund des Mainzer Beckens.- Notizbl. Hess. L.-Amt Bodenforsch., 81, S. 314 - 335, 2 Abb., 2 Tab., Wiesbaden.
- (1954): Ionenumtausch und Chemismus von Grund- und Mineralwässern.- Z. Deutsch. Geol. Ges., 106, S. 16 - 22, 2 Abb., 1 Tab., Stuttgart.
- SMITH, D.B., DOWNING, R.A., MONKHOUSE, R.A., OTLET, R.L. & PEARSON, F.J. (1976): The age of groundwater in the chalk of the London Basin.- Wat. Resources Res., 12, Nr. 3, S. 392 - 404, 7 Abb., 4 Tab., Washington.
- THATCHER, L.L. & PAYNE, B.R. (1965): The distribution of tritium in precipitation over continents and its significance to ground-water dating.- In: Radiocarbon and Tritium Dating Conf., S. 604 - 619, Pullman, Washington.
- THILO, L. & MÜNNICH, K.O. (1970): Reliability of carbon-14 dating of groundwater: effect of carbonate exchange.- In: Isotope Hydrology, S. 259 - 269, 7 Abb., 1 Tab., Wien (IAEA).
- TILLMANN, H. (1953): Geologisch-Hydrologische Karte von München 1:50 000.- München (Bayer. Geol. LA).
- TRAUB, F. (1956): Hydrogeologische Übersichtskarte 1:500 000, Blatt München mit Erläuterungen.- 121 S., 6 Abb., 31 Tab., Remagen (Bundesanstalt für Landeskunde).
- UDLUFT, P. (1975): Das tiefere Grundwasser zwischen Vinde-licischem Rücken und Alpenrand.- Geol. Jb., Reihe C, H. 11, S. 3 - 29, 12 Abb., 1 Tab., Hannover.

- ULBRICH, R. (1973): Das Grundwasser im Jungtertiär zwischen Donau, Iller und Isar.- Wasserwirtschaft, 63, H. 7, S. 216 - 218, 1 Abb., Stuttgart.
- VILLINGER, E. (1977): Über Potentialverteilung und Strömungssysteme im Karstwasser der Schwäbischen Alb (Oberer Jura, SW-Deutschland).- Geol. Jb., Reihe C, H. 18, S. 3 - 93, 9 Abb., 11 Tab., 2 Taf., Hannover.
- VOGEL, J.C. (1967): Investigation of groundwater flow with r adiocarbon.- In: Isotopes in Hydrology, S. 355 - 368, 7 Abb., 5 Tab., Wien (IAEA).
- (1970): Carbon-14 dating of groundwater.- In: Isotope Hydrology, S. 225 - 237, 6 Abb., 2 Tab., Wien (IAEA).
- WENDT, I., STAHL, W., GEYH, M.A. & FAUTH, F. (1967): Model experiments for ^{14}C water-age determinations.- In: Isotopes in Hydrology, S. 321 - 336, 11 Abb., 3 Tab., Wien (IAEA).
- WEYER, K.U. (1972): Ermittlung der Grundwassermengen in den Festgesteinen der Mittelgebirge aus Messungen des Trockenwetterabflusses.- Inaugural-Dissertation Univ. Bonn, 130 S., 40 Abb., 11 Tab., Bonn.
- WUNDT, W. (1967): Eine Schätzung des frei abflußfähigen Grundwasservorrats.- GWF, 108, H. 34, S. 953 - 961, 4 Abb., München.
- ZIMMERMANN, U., EHHALT, D. & MÜNNICH, K.O. (1967): Soil-water movement and evapotranspiration: changes in the isotopic composition of the water.- In: Isotopes in Hydrology, S. 567 - 584, 17 Abb., 1 Tab., Wien (IAEA).

9. Anhang

Tabelle 8: Isotopengehalte der Grundwasserproben aus dem Jungtertiär im Raum München und Augsburg.
FOK = Filteroberkante

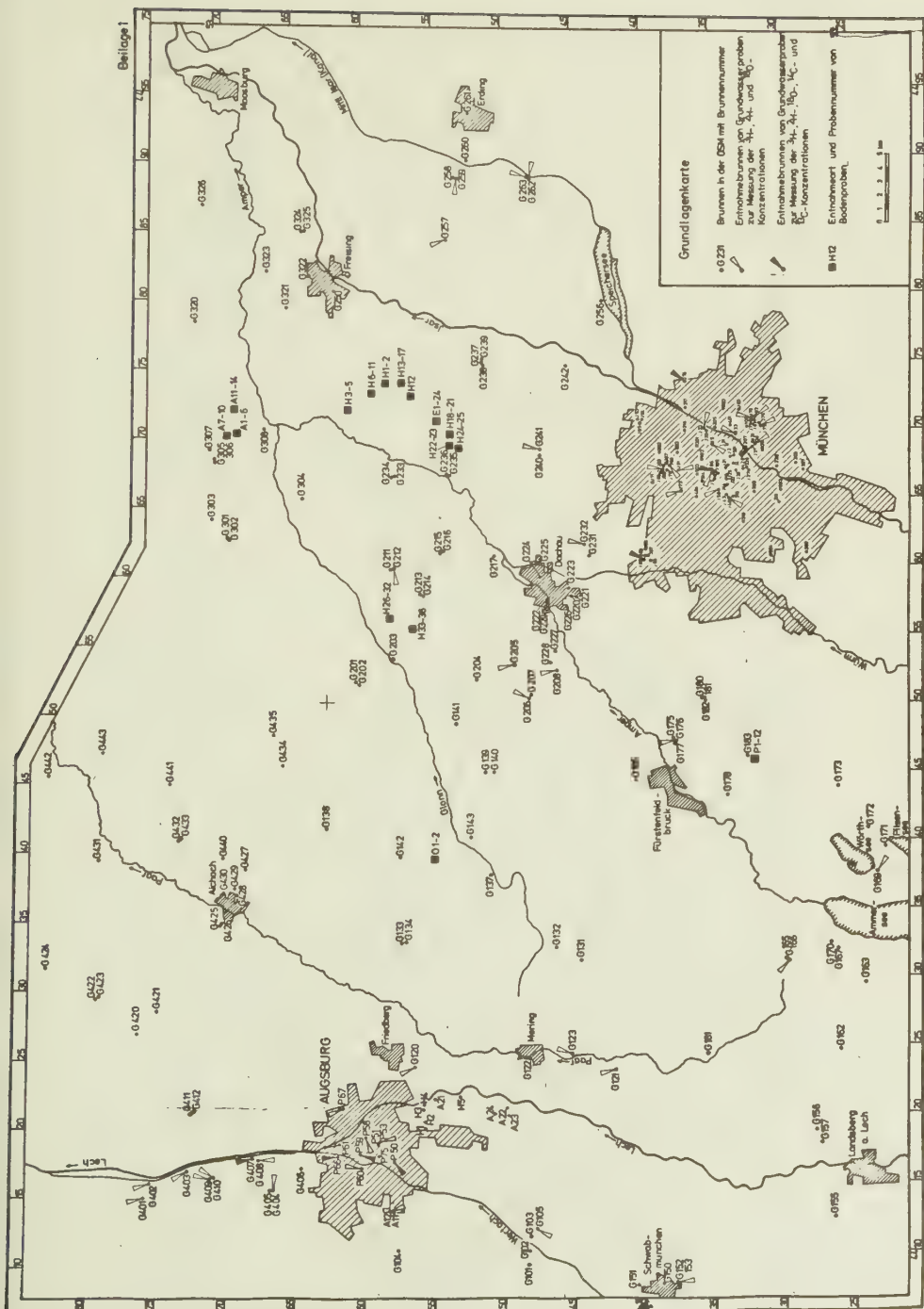
Brunnen	Brunnen- tiefe (m)	FOK m u.G.	$\delta^3\text{H}$ (TU)	δD ‰	$\delta^{18}\text{O}$ ‰	$\delta^{13}\text{C}$ ‰	^{14}C % mod.
BMW 3	215,0	75,0	4,2	-79,0	-10,88	-	-
BMW 6	198,6	72,5	1,5	-78,7	-10,79	-	-
Löwenbräu 4	78,0	20,5	5,0	-73,3	-10,05	-	-
Löwenbräu 6	220,0	192,0	1,5	-81,3	-11,23	- 4,6	18,7 $\pm$ 0,6
Paulaner 3	200,0	51,0	2,3	-78,2	-10,81	-	-
Siemens 1	155,0	59,4	1,5	-87,1	-11,93	-	-
Kr.-Maffei 3	130,0	52,0	1,5	-68,0	- 9,04	-	-
Ellwanger	81,5	55,5	1,5	-76,2	-10,60	-	-
DB Kraftwerk	289,7	218,5	2,5	-81,0	-11,03	-	-
Metz. TK 74	232,5	219,0	1,5	-87,4	-12,01	-	-
LZB	105,5	45,5	1,5	-82,1	-11,29	-	-
Biol. VA	82,5	61,5	36,0	-76,0	-10,40	-	-
Deller	144,0	62,0	1,5	-75,4	-10,10	-	-
Dt. Lloyd	87,5	42,0	188,0	-66,5	- 8,83	-	-
Hofbräu	88,0	43,0	43,0	-74,5	-10,12	-	-
Pfanni 7	106,5	54,0	38,5	-80,7	-11,03	-	-
Pfanni 8	251,5	208,0	1,0	-97,8	-13,23	-	-
Pfanni 10	152,3	53,3	3,4	-85,8	-11,74	-	-
Pfanni 11	120,8	53,0	1,3	-82,0	-11,25	-	-
DB Kraftwerk	289,7	218,5	1,0	-80,2	-10,92	-	-
Metz. TK 74	232,5	219,0	1,0	-88,8	-11,98	-	-

Tabelle 8 - Fortsetzung

Brunnen	Brunnen- tiefe (m)	FOK m u.G.	^3H (TU)	δD ‰	$\delta^{18}\text{O}$ ‰	$\delta^{13}\text{C}$ ‰	^{14}C % mod.
Ellwanger	81,5	55,5	1,2	-76,8	-10,46	-12,6	47,2 $\pm$ 1,2
Paulaner 2	235,6	203,6	0,4	-92,2	-12,44	-11,2	7,9 $\pm$ 0,5
Kr.-Maffei 3	130,0	52,0	0,6	-68,5	- 8,94	-11,8	39,5 $\pm$ 1,0
MAN Augsburg	82,0	46,7	6,4	-72,4	-10,16	-	-
Bürgerbräu	162,2	85,8	1,5	-81,2	-11,27	-	-
Höchst Bob.	63,0	21,5	43,0	-71,2	- 9,96	-	-
Hö. Gersth. N	131,5	58,5	6,6	-71,9	- 9,97	-	62,2 $\pm$ 2,0
Augusta	102,0	80,0	13,8	-74,0	-10,22	-	-
Thorbräu	163,7	124,2	1,5	-83,8	-11,59	-	-
Elbeo	93,5	37,0	1,5	-72,0	-10,08	-	-
Gold. Gans		31,0	28,7	-75,1	-10,43	-	-
Riegele	70,7		1,5	-73,5	-10,26	-	-
Hö. Gersth. S			6,3	-71,7	- 9,95	-	-
Hasenbräu	185,5	102,0	1,5	-85,5	-11,79	-	-
Elbeo	93,5	37,0	0,7	-73,0	- 9,91	-13,3	52,1 $\pm$ 1,3
Thorbräu	163,7	124,2	0,7	-84,1	-11,65	-12,2	6,9 $\pm$ 0,6
Bürgerbräu	162,2	85,8	0,7	-82,3	-11,17	-12,4	8,2 $\pm$ 0,5
Kraft SMÜ 2	169,7	84,5	1,0	-76,7	-10,53	-	-
Gersthofen X	251,5	74,0	0	-73,2	-10,08	-	-
Michalke 4	79,2	42,2	5,3	-72,7	-10,10	-	-
Michalke 5			0,9	-72,5	- 9,96	-	-
Reiter 1	155,2	39,7	0,1	-71,8	-10,02	-	-
Meitingen	187,0	59,0	16,0	-76,4	-10,56	-	-
Best, Herb.	187,0	54,0	2,4	-74,0	-10,13	-	-

Tabelle 8 - Fortsetzung

Brunnen	Brunnen- tiefe (m)	FOK m u.G.	^3H (TU)	δD ‰	$\delta^{18}\text{O}$ ‰	$\delta^{13}\text{C}$ ‰	^{14}C % mod.
Langweid	216,5	45,0	0,4	-74,0	-10,25	-	-
Prinz, Augsb. 189,0		69,0	0	-83,5	-11,56	-	-
Augsburg 2		91,4	0,4	-74,7	-10,43	-	-
Friedberg	129,0	30,0	87,0	-71,9	-10,11	-	-
Emmering 2	230,0	55,0	0,2	-77,1	-10,40	-	-
Türkenfeld 2	209,5	67,0	0,3	-73,1	- 9,90	-	-
Schmiechen	124,5		6,2	-73,5	-10,17	-	-
Merching	119,5	56,0	0	-75,2	-10,37	-	-
Karlsfeld 2	202,5	40,0	1,0	-78,7	-10,56	-	-
Feldgeding	130,0	70,0	0	-76,4	-10,55	-	-
Eisolzried	97,5	62,5	0,3	-74,5	-10,26	-	-
Oberbachern	120,0	70,3	0	-75,3	-10,28	-	-
Oberding 2	140,0	35,0	14,9	-73,8	-10,25	-	-
Moosinning 2	107,0	44,5	8,4	-76,0	-10,47	-	-
Moosinning 1	50,0	33,0	20,8	-76,2	-10,51	-	-
Wildschwaige	70,0	58,0	0,1	-71,7	- 9,88	-	-
Oberschleißh. 132,0		32,0	0,5	-69,3	- 9,50	-	-
Bachern 3	102,0	25,0	39,0	-71,9	- 9,97	-	-
Vierkirchen 2	102,0	54,0	2,6	-73,9	-10,26	-	-
Wildschwaige	70,0	58,0	0,05	-72,3	- 9,97		
Oberbachern	120,0	70,3	0,14	-75,4	-10,42		
Oberschleißh. 132,0		32,0	0,09	-70,2	- 9,52		

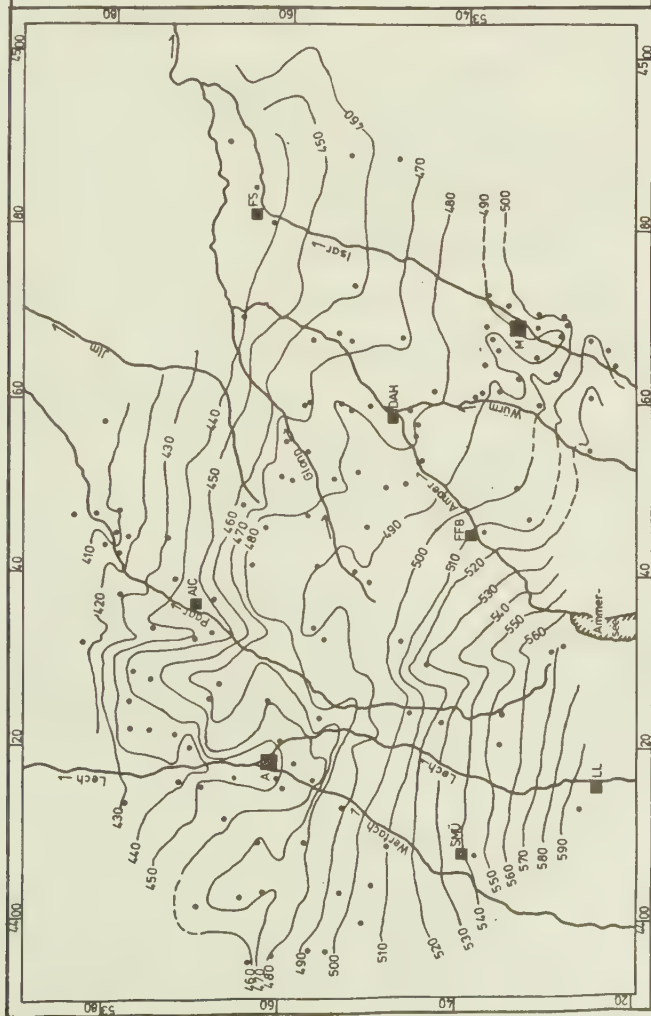


Höhengleichen des jungtertiären Grundwassers aus grundwasserführenden Schichten zwischen 50 m und 160 m u. Gel.

— 490 —
— 500 —
Grundwasserhöhengleichen [m ü. NN]

• Brunnen im Jungtertiär

Abkürzungen siehe Abb. 5



Lebenslauf

Richard Egger

geboren am 20. 9. 1946 in Augsburg

Meine Eltern: Richard Egger, Wagnermeister
Centa Egger, geb. Weber

Schulzeit: 1952 - 1956 Volksschule Bobingen
1956 - 1962 Hum. Gymnasium bei St. Stephan,
Augsburg
1967 - 1970 Bayernkolleg Augsburg

Reifeprüfung: Februar 1970, Bayernkolleg Augsburg

Studium: 1970 - 1975 Geologie, Universität München

Diplom-Hauptprüfung: 1. 12. 1975

Vom 1. 1. 1976 bis 30. 4. 1978 am Institut für
Radiohydrometrie der Gesellschaft für Strah-
len- und Umweltforschung mbH

Meine akademischen Lehrer waren:

G. Angenheister, H. J. Autrum, J. Bodechtel, H. P. Boehm, R. Dehm,
A. Faessler, V. Fahlbusch, O. Förtsch, W. -D. Grimm, H. Hagn,
L. Happel, H. G. Huckenholz, H. Jagodzinski, O. Kandler, D. D. Klemm,
A. Maucher, H. Moser, F. Neumaier, H. Nöth, K. Schmidt, H. Schröcke,
H. Soffel, G. Troll, F. Wilhelm

